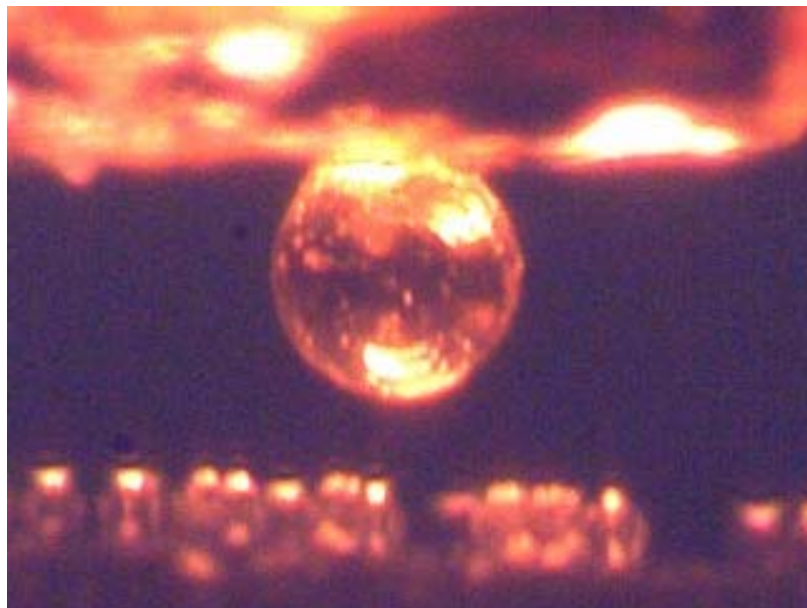


Micro-gripper à haute dynamique

Julien Moulin, microtechnique



Assistants: Benoît Lorent, Mélanie Dafflon, Walter Driesen

Professeur: Reymond Clavel

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Etat de l'art	7
1.2	Projet	8
2	Aspects théoriques de la prise et de la dépose	9
2.1	Modèle théorique.....	9
2.1.1	Forces	9
2.1.2	Prise.....	9
2.1.3	Dépose.....	10
3	Installation de micromanipulation : description et limitations.....	11
3.1	Présentation	11
3.1.1	Installation de micromanipulation.....	12
3.1.2	Billes.....	13
3.1.3	Gripper	14
3.1.4	Substrat.....	14
3.1.5	Electronique	15
3.1.6	Récapitulatif des constantes utilisées fréquemment.....	16
3.2	Bande passante du système	17
3.2.1	Bande passante électrique	17
3.2.2	Bande passante mécanique du système poutre-piézo-gripper :.....	17
3.2.3	Bande passante mécanique du piézo	18
3.2.4	Atténuation du mouvement du piézoélectrique.....	19
3.2.5	: Résumé des bandes passantes	20
3.2.6	Paramètres géométriques importants et améliorations.....	21
3.3	Modèle.....	21
3.3.1	Prise.....	21
3.3.2	Dépose.....	22
4	Caractérisation.....	27
4.1	Conditions d'expérimentation	27
4.1.1	Air ambiant.....	27
4.1.2	Azote	27
4.1.3	Propreté des surfaces	27
4.1.4	Electrostatisme	28
4.2	Tests préliminaires	29
4.2.1	Test avec des billes de polystyrène	29
4.2.2	Tests avec des billes de pollen	31
4.2.3	Echauffement de l'amplificateur	32
4.3	Conclusion des tests préliminaires	33
4.3.1	Compliance du système.....	34
4.4	Caractérisation de la prise et de la dépose.....	38
4.4.1	Caractérisation de la prise	38
4.4.2	Caractérisation de la dépose.....	41
4.5	Caractérisation de la précision et répétabilité de la dépose.....	47
4.5.1	Gripper de Verre.....	48
4.5.2	Gripper de Si	49
4.5.3	Conclusion caractérisation de la précision et de la répétabilité	49
4.6	Tests complémentaires	51
4.6.1	Prise normale et roulée	51

4.6.2 Prise à force constante	52
4.6.3 Dépose en vibration.....	53
4.6.4 Nettoyage des billes	53
5. Gripper passif.....	54
6. Conclusion.....	55
Bibliographie.....	56
Annexe : Excitation carrée	57
Annexe : Calcul des lames	60
Dessins de détail du système de compliance.....	61

1 Introduction

Dans le monde macroscopique, attraper un objet paraît simple. Par exemple pour un humain utiliser notre main comme une pince est évident.

Par contre, dès que les objets deviennent plus petits la chose devient plus ardue. Qui n'a jamais mouillé son doigt pour attraper une petite miette de pain ? La raison principale de cette difficulté est que nous sommes habitués à travailler avec la force de gravité, qui, lorsque les objets deviennent petits, tend à être négligeable par rapport aux forces d'adhésion.

Au LSRO, nous nous efforçons d'inventer, de tester et de caractériser des méthodes de prise et dépose pour des objets de tailles microscopiques. Les difficultés rencontrées, par rapport au monde macroscopique, se situent dans la compréhension des forces d'adhésion. Dans ces forces, il faut citer entre autre les forces de van der Waals, de capillarité et électrostatique... Des exemples de méthodes pour la prise d'objets microscopiques peuvent être cités suivant le type de force qu'ils utilisent :

- force de frottement : ce type de force est typiquement utilisé pour les pinces qui nécessitent 2 ou plusieurs doigts avec au minimum un doigt qui peut être déplacé.

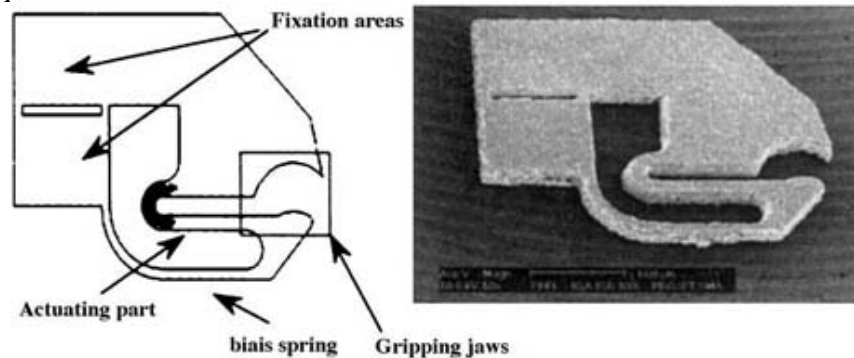


Figure 1: SMA monolithic gripper[1]

- force de dépression : on utilise cette force dans le cas de gripper à « pompe à vide ». Le principe est que la dépression formée entre le gripper et l'objet à manipuler maintient celui-ci par succion.

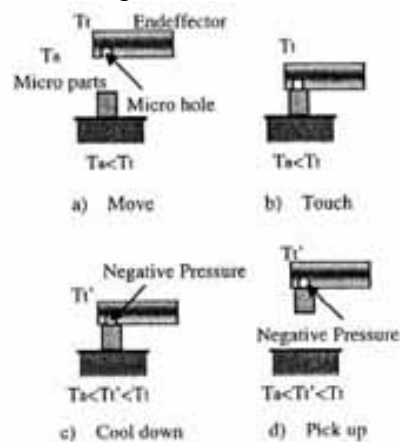


Figure 2: Principe du gripper à dépression [1]

- force électrostatique : un champ électrique créé entre deux électrodes sert à attraper l'objet à manipuler. Ce procédé pose des problèmes de dépose.

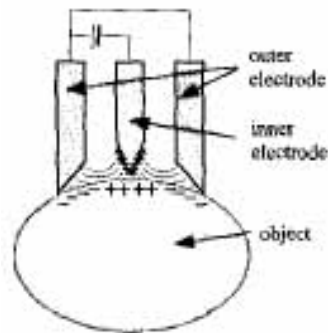


Figure 3: Principe du gripper électrostatique [1]

- surface de tension : une goutte d'eau peut être utilisée pour attraper des objets. La relâche et la prise se fait un déformant dynamiquement la goutte d'eau

Ce projet consiste à tester une méthode basée sur les forces d'adhésion pour la prise, tandis que pour la dépose la force d'inertie sera utilisée pour rompre l'équilibre $\sum F = ma$.

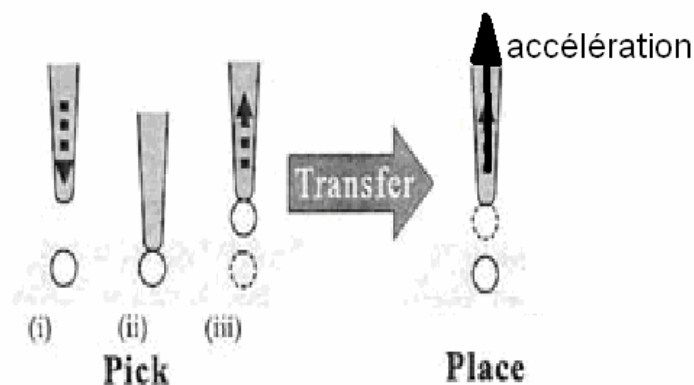


Figure 4: Représentation du procédé de pick (par adhésion) and place (par effet dynamique) [1]

La prise et la dépose seront caractérisées dans des cas choisis pour entre autre définir la répétabilité et la précision d'un tel système, ainsi que les accélérations nécessaires à la dépose d'objet.

1.1 Etat de l'art

La dépose d'objet par force d'inertie est déjà expérimentée, notamment par Stéphane Régnier à Paris. Elle est réalisée grâce à une poutre que l'on fait vibrer. Cette méthode fonctionne déjà et a été caractérisée. Par contre, la précision et la répétabilité n'ont jamais fait l'objet de caractérisation.

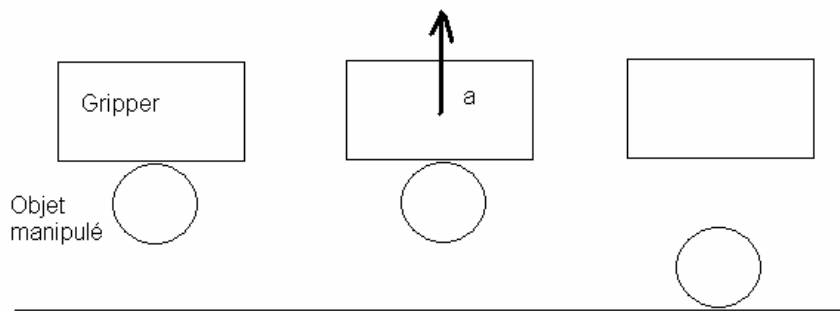


Figure 5: Principe de fonctionnement de la dépose dynamique

Le point critique pour avoir une dépose de qualité réside dans le fonctionnement de préhenseur. La solution proposée est de faire vibrer une poutre au bout de laquelle est fixée la surface de contact. Elle ne paraît pas idéale car on ne sait pas quand l'objet manipulé va tomber lorsque la poutre vibre (figure 6).

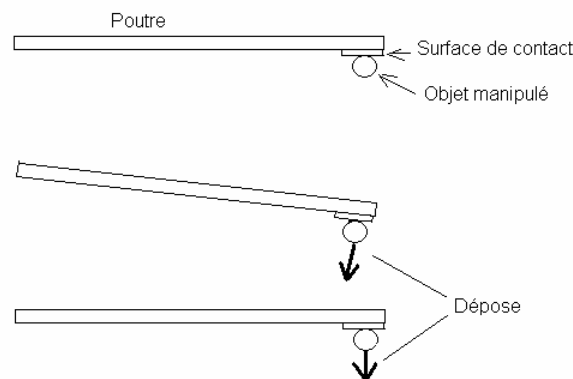


Figure 6: Schéma du préhenseur de S Régnier et illustration de dépose

Les travaux se sont notamment concentré sur la manipulation de billes de verres d'un diamètre de 40-50[μm] et ont montré que la dépose dynamique était possible, ainsi que l'existence d'un seuil d'accélération au-dessus duquel toutes les billes d'un même type sont déposées. Un autre point important démontré est que la dépose est possible même avec un préhenseur à haute énergie de surface qui garantit ainsi la prise. [2]

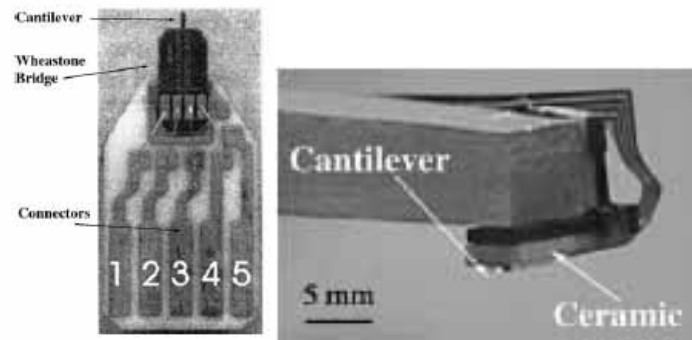


Figure 7: Photos du gripper de S. Regnier [1]

1.2 Projet

Le but de ce projet est de relâcher des composants d'une taille caractéristique de 50 microns par un effet dynamique.

La prise s'effectuera par adhésion, ce qui consiste venir déposer le préhenseur sur l'objet à manipuler. Lorsque le préhenseur est retiré l'objet reste collé dessus (figure 4).

Pour arriver à une dépose de qualité, un piézoélectrique servira d'élément pour accélérer la bille. L'avantage flagrant par rapport à une poutre est que l'on contrôle bien le mouvement du piézoélectrique et donc de l'objet qui est collé dessus. En effet, en assurant un mouvement parfaitement vertical de la surface de contact, l'objet manipulé devrait être déposé verticalement. On retrouve exactement le principe décrit dans la figure5.

Une caractérisation de la prise et de la dépose sera effectuée dans ce projet pour montrer la viabilité de ce système par rapport aux autres gripper testés dans ce laboratoire. Les mesures seront concentrées sur les points suivants :

- précision
- répétabilité
- taux de succès de la prise et de la dépose
- accélération nécessaire à la dépose

Il sera encore étudié l'influence de certains paramètres :

- matériaux de l'objet manipulé et des différentes surfaces de contact (gripper et substrat)
- type d'accélération
- type de milieu selon son humidité
- type de prise

Au vu de tous les paramètres et mesures à faire, il sera dans un premier temps défini des cas favorables pour permettre une caractérisation plus approfondie dans les cas les plus intéressants.

2 Aspects théoriques de la prise et de la dépose

Dans ce chapitre, nous nous efforcerons d'aborder les aspects théoriques qui justifient le fonctionnement de notre gripper sans nous soucier du matériel à disposition.

2.1 Modèle théorique

L'étude des forces d'adhésion est très complexe et dépend d'une grande quantité de paramètres. Pour s'affranchir de la difficulté d'une telle étude, il convient d'utiliser un modèle simplifié.

2.1.1 Forces

Nous considérerons que nous travaillons avec des billes comme objets à manipuler.

Les forces à évaluer sont le poids et la force d'adhésion.

Le poids est décrit par la loi :

$$P = mg = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad (1)$$

où R est le rayon de la bille, ρ sa masse volumique et g la constante de gravitation

Le modèle, basé sur la théorie JKR pour les forces d'adhésion est directement inspiré de [3]. Il est destiné à estimer la force de liaison entre une surface et une sphère, soit notre gripper ou notre substrat et nos billes. Une des hypothèses importantes est que l'on considère que la surface de contact entre les surfaces est minimale ; c'est-à-dire que la bille ne doit pas être écrasée par le gripper ce qui, nous le verrons plus tard, posera quelques problèmes.

La force d'adhésion est décrite par :

$$F_{ad} = \frac{3}{2} \pi R W \quad (2)$$

$$\text{où } W = 2 \sqrt{\gamma_1 \gamma_2}, \quad (3)$$

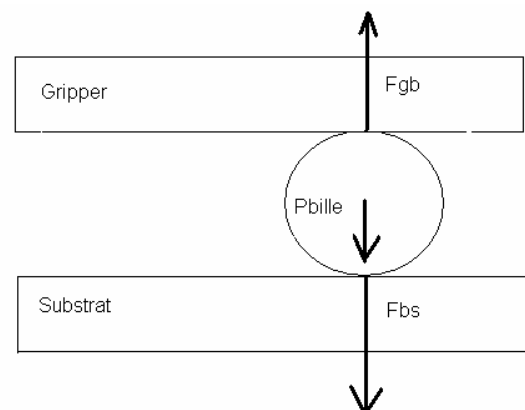
les γ_i représentant l'énergie de surface du gripper ou du substrat et de la bille, m la masse de la bille et ρ sa masse volumique.

2.1.2 Prise

Pour s'assurer la prise, il nous faut le bilan de force suivant :

$$F_{SB} + P_{bille} < F_{BG} \quad (4)$$

où F_{SB} est la force d'adhésion entre la bille et le substrat, F_{BG} celle entre la bille et le gripper et P_{bille} le poids de la bille (le S désigne le substrat le B la bille et le G le gripper).



On devra donc avoir :

$$\frac{F_{BG}}{F_{SB} + P_{bille}} > 1 \quad (5)$$

Pour assurer une bonne prise, il faudra que le rapport soit nettement supérieur à 1.

2.1.3 Dépose

Afin de déterminer les forces en jeu lors d'un mouvement, il faut prendre l'équation de Newton (qui décrit un équilibre):

$$\sum F = ma$$

La dépose s'effectue grâce à l'inertie de la bille attrapée. Il faudra donc une accélération suffisante pour vaincre la force d'adhésion entre la bille et le gripper, c'est-à-dire qu'il faut rompre l'équilibre, ce qui correspond à:

$$\sum F < ma$$

Dans notre cas :

$$ma - P_{bille} > F_{gb}$$

L'équation (2) peut aussi s'écrire en incluant la masse :

$$\text{On a par exemple de (1) : } \pi = \frac{3m}{4R^3 \rho}$$

Ce qui nous donne :

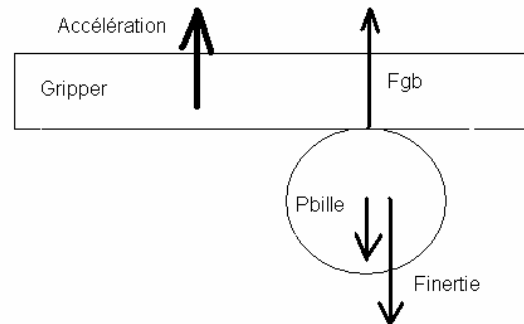
$$F_{ad} = \frac{9Wm}{8R^2 \rho} \quad (7)$$

On obtient ainsi :

$$ma - P_{bille} > \frac{9Wm}{8R^2 \rho} \quad (8)$$

Le seul paramètre qui nous est inconnu dans cette inégalité est l'accélération qu'il faudra déterminer pour pouvoir déposer nos billes :

$$a > \frac{1}{m} \left(\frac{9Wm}{8R^2 \rho} - P_{bille} \right) \quad (9)$$



3 Installation de micromanipulation : description et limitations

Dans ce chapitre, il sera présenté le matériel à disposition et, dans un second temps, le modèle théorique sera adapté au cas réel de notre installation.

3.1 Présentation

Un bref aperçu du fonctionnement d'un piézoélectrique est nécessaire à la compréhension de la suite.

La piézoélectricité est le nom que l'on donne lorsque des charges sont générées par une contrainte mécanique sur un cristal dont la symétrie remplit certains critères. L'effet réciproque qui nous intéresse plus particulièrement est qu'un piézoélectrique se déforme mécaniquement lorsqu'il est soumis à un champ électrique.

L'effet réciproque suit la loi :

$$\text{Déplacement} = d \cdot U$$

Où U est la tension appliquée et d le coefficient piézoélectrique [m/V].

Le coefficient piézoélectrique est en fait un tenseur du troisième ordre. Pour simplifier, nous admettons que la valeur d'une propriété varie avec la tension appliquée et la direction du mouvement induit : par exemple le d_{33} relie le déplacement généré par une tension appliquée sur la même surface alors que le d_{13} relie le déplacement généré par une tension appliquée à une surface perpendiculaire.

Dans notre cas, seul le d_{33} nous intéresse car la tension est appliquée sur les faces que l'on veut déplacer.

Finalement, le piézoélectrique peut être considéré électriquement comme une capacité. Le facteur ϵ_r représente la permittivité relative du piézoélectrique par rapport au vide (à nouveau le ϵ_r est un tenseur qu'on a simplifié).

	ϵ_r	d_{33} [pm/V]
PIC 151	2400	450

Tableau 1 : Constante de piézoélectrique PIC151

3.1.1 Installation de micromanipulation

Le set up permettant les micromanipulations contient un robot Delta³ qui a été développé au LSRO. Ce robot à 3ddl xyz a déjà servi à la caractérisation de différentes autres méthodes de préhension :

Course : ± 2 [mm]

Répétabilité : ± 10 [nm]

L'installation comprend notamment les éléments suivants (photo 1) autre le robot (photo 1 avec logo EPFL):

1. Zone de travail avec le gripper et le substrat
2. Entrée d'azote
3. 2 microscopes
4. Réglage manuel de l'emplacement du substrat
5. Réglage du débit d'azote
6. Mise au point et déplacement des microscopes

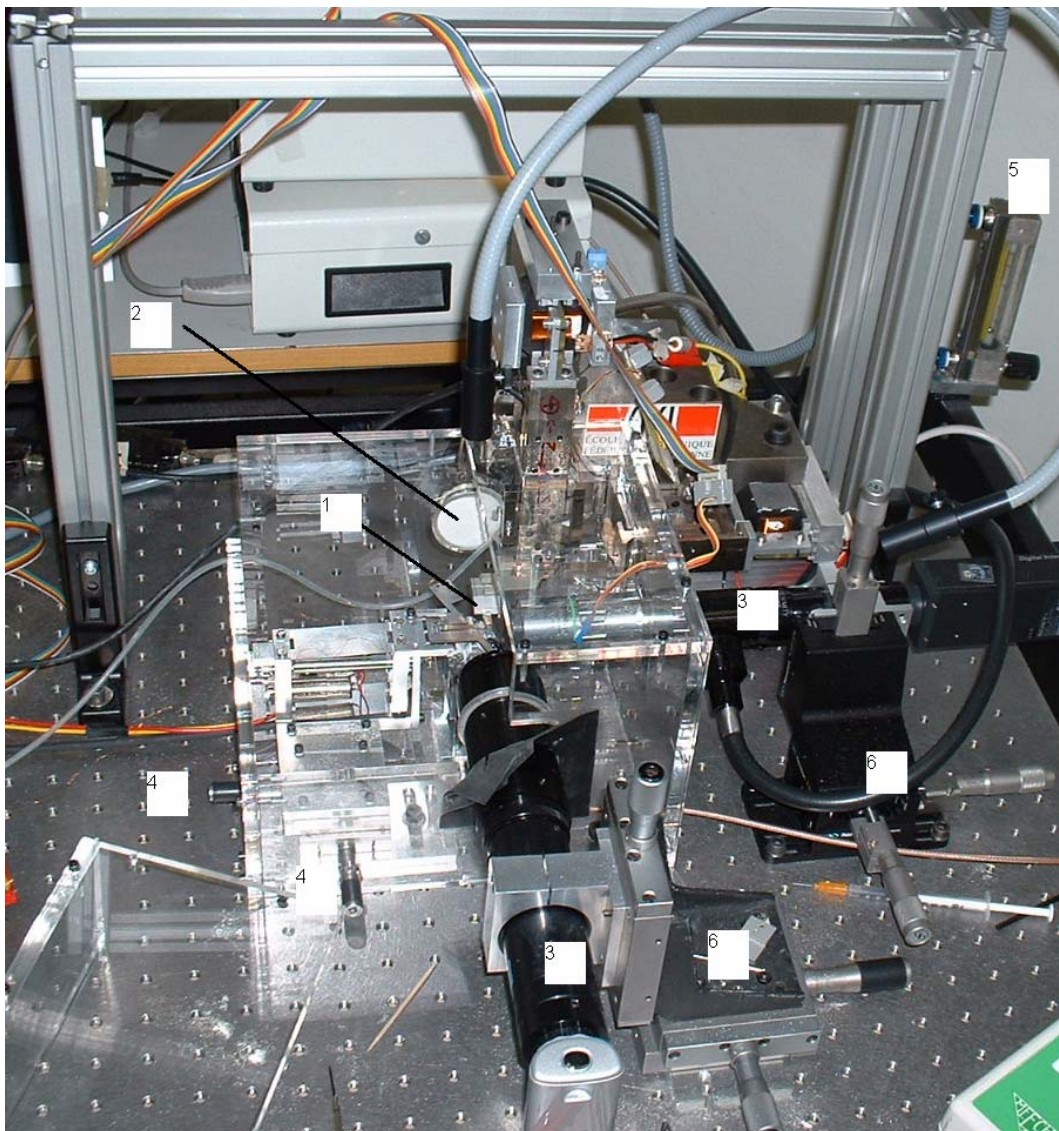


Photo 1 : Installation de micromanipulation

Le robot se déplace grâce à un programme sur un PC à côté de la place de travail. Les éléments importants de l'interface utilisateur sont (photo 2):

1. Vue de côté
2. Vue de dessous
3. Dispositif optique permettant de mesurer l'emplacement des billes (croix bleue)
4. Contrôle de la position du robot
5. Mesure de l'emplacement des billes

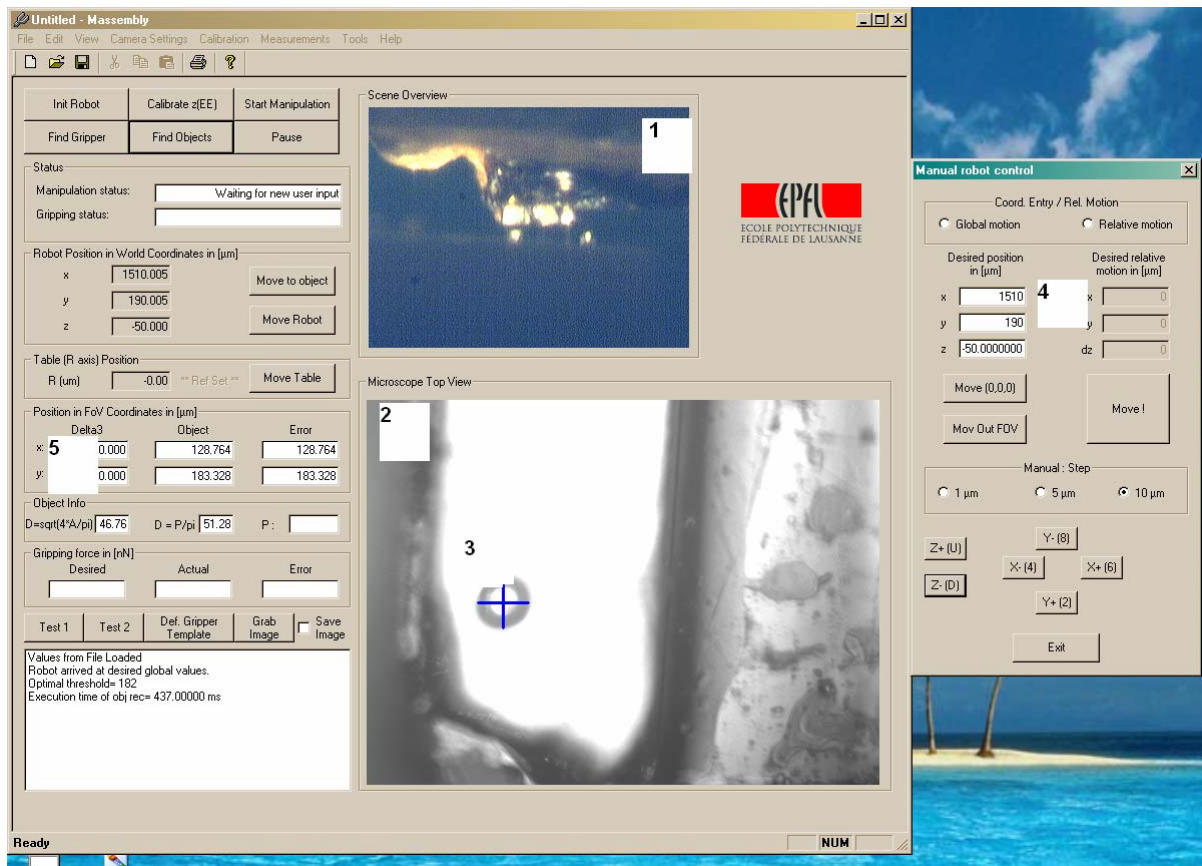


Photo 2 : Screenshot de l'interface d'utilisation de l'installation

3.1.2 Billes

Les billes qui ont été manipulées sont essentiellement des billes de polystyrène de 50 microns. Dans une petite phase de test, des pollens ont aussi servi. Leur avantage est qu'ils sont souples par rapport à des billes de polystyrène rigides.

	Diamètre [μm]	ρ [gr/cm ³]	γ [mJ/m ²]	Poids [μN]
Pollen	40	0.549	35	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Polystyrène	50	1.05	33	$5,4 \cdot 10^{-3}$

Tableau 2: Caractéristiques des objets manipulés

3.1.3 Gripper

Le gripper a été conçu durant l'été précédant le semestre par les assistants. Il a servi durant tout le projet, car ces caractéristiques correspondaient bien aux tâches prévues.

Le gripper, dans sa version initiale, est essentiellement composé des éléments suivants :

- 1 : une poutre qui sert à positionner notre gripper dans l'espace de travail
- 2 : un piézoélectrique de type PIC 151 qui donne les accélérations nécessaires à une dépose.
- 3 : une plaquette de Si, collée sur le piézoélectrique, qui fait office de surface de contact

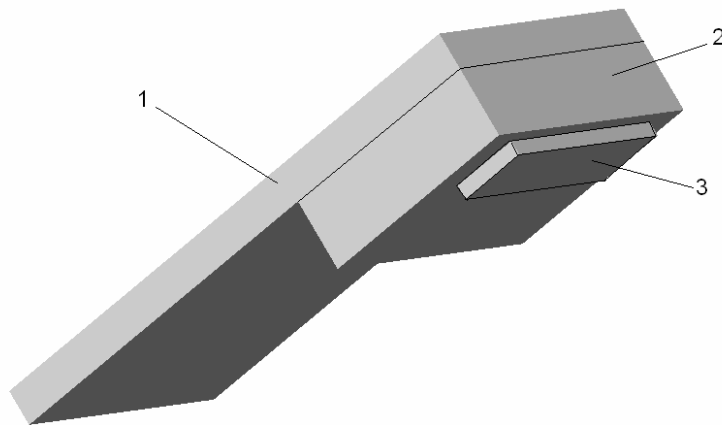


Figure 8: Schéma du préhenseur

A ces trois parties, il faut rajouter deux fils de cuivre qui assurent la connexion du piézoélectrique et une pièce qui permet de lier la poutre au robot delta.

	ρ [gr/cm ³]	γ [mJ/m ²]	E [Gpa]	Poisson	Taille [mm ³]	Masse [gr]
Plaquette en Silicium	2.3	1400	140	0.17	0.2*1*3	0.00138
Poutre en Ac	7.8		200	0.3	0,5*4*8	0.1248
Piézo PIC 151	7.8		66.7		4*3*1	0.0936

Tableau 3 : Paramètres mécaniques importants des matériaux du gripper

3.1.4 Substrat

Le substrat est une pièce transparente sur laquelle les billes à attraper sont déposées. Deux types de verre ont été utilisés : du verre normal et du verre coâté. Le coating de notre verre est un coating hydrophobe qui consiste en une couche Perfluoroalkyl déposée par le laboratoire du Dr P. Hoffmann de l'institut d'optique appliquée (IOA) de l'EPFL.

Le coating sert à diminuer la force d'adhésion du matériau. En effet, en étant hydrophobe, il n'y aura pas ou peu d'eau à la surface du substrat et donc le ménisque d'eau créé par le contact entre la bille et le substrat sera petit, diminuant ainsi la force d'adhésion.

La qualité d'un coating hydrophobe se mesure avec l'angle à que forme une goutte avec le substrat. Les mesures donnent :

	Angle en degré	ρ [gr/cm ³]	γ [mJ/m ²]
Verre non coaté	26	2.3	30
Verre coaté	108	2.3	~18

Tableau 4: Mesure de mouillabilité d'un verre coaté et non coaté et autres caractéristiques

Nous remarquons ainsi que le coating est bien efficace.

3.1.5 Electronique

Il reste encore à exciter le piézoélectrique. Pour ce faire un simple générateur de fonctions mis en série avec un ampli est suffisant.

L'ampli de puissance (photo 3) a un gain théorique de 20.



Photo 3 : Amplificateur

Cependant, notre électronique a une réponse en fréquence de type passe bas. Cette réponse a été mesurée avec une excitation sinusoïdale de 10[V]. Elle est représentée dans le graphe suivant :

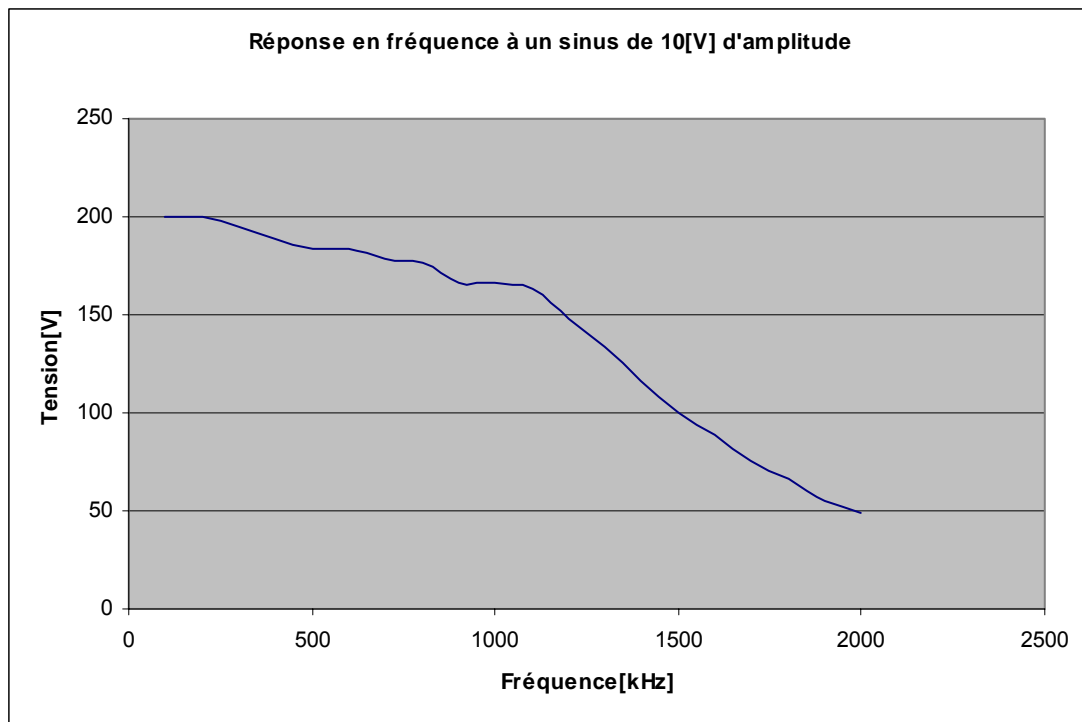


Figure 9: Réponse de l'ampli est fréquence pour une excitation sinusoïdale de 10[V]

Il est évident que cette réponse en fréquence influera sur le déplacement du piézoélectrique et ainsi sur l'accélération qu'il nous fournira.

3.1.6 Récapitulatif des constantes utilisées fréquemment

Par rapport à ce qui a été présenté, une catégorie verre gripper a été ajoutée, car c'est un élément qui sera utilisé plus loin dans le projet :

	ρ [gr/cm ³]	γ [mJ/m ²]	E [Gpa]	Poisson
Verre gripper	2.3	170		
Verre substrat	2.3	30		
Verre coaté	2.3	~18		
Si	2.3	1400	140	0.17
Pollen	0.549	35	3.4	0.39
Polystyrène	1.05	33		
Ac	7.8		200	0.3
Al	2.8		73	0.3

Tableau 5: Propriété des différents matériaux utilisés

3.2 Bande passante du système

3.2.1 Bande passante électrique

Notre système électrique est en fait un banal circuit RC, où le piézoélectrique est la capacité et la résistance les fils de cuivre qui assure son contact. Les caractéristiques du piézo se retrouvent dans les tableaux 1 et 3.

On peut donc calculer sa capacité :

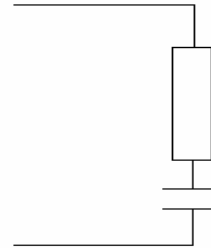
$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S / d = 255 [\text{nF}] \quad (11)$$

La résistance du câblage a été mesurée et vaut $2[\Omega]$ par fil et de $0,4[\Omega]$ par contact, pour un total de $4,8[\Omega]$.

On obtient ainsi une constante de temps de :

$$\tau = RC = 255 = 1,224 [\text{ns}]$$

Figure 10 : Schéma électrique du système



Soit une fréquence de coupure de

$$f_{\text{elec}} = 1 / \tau = 817 [\text{MHz}]$$

3.2.2 Bande passante mécanique du système poutre-piézo-gripper :

En faisant vibrer le piézoélectrique, cela va exciter le système poutre et le piézo et plaquette de Si qui sont posés dessous. Il faut bien se rendre compte que contrairement au préhenseur présenté dans l'état de l'art (Chap1.1) la vibration de la poutre doit être minimisée et ne sert en rien à la dépose du préhenseur. Le modèle correspondant est celui d'une poutre encastrée avec une masse (figure 11).

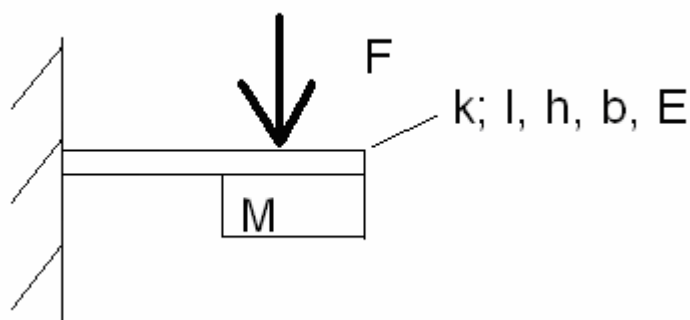


Figure 11: Modèle mécanique du système

Pour ce système la formule de Reyleigh est utilisée afin de déterminer la fréquence de résonance du système :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{poutre} + m_{Si} + m_{piezo}}} \quad (12)$$

Le calcul de la raideur k de la poutre s'effectue comme suit :

$$k = 3EI/l^3 \quad (13)$$

où E est le module de Young de l'acier I le moment d'inertie de la poutre et l sa longueur
De plus,

$$I = bh^3/12 \quad (14)$$

où b est la largeur et h la hauteur de la poutre
soit :

$$k = Ebh^3/12l^3 \quad (15)$$

Ainsi, avec les valeurs du tableau 3 :

$$k = 16276 \text{ [N/m]}$$

donc

$$f_0 = 1.37 \text{ [kHz]}$$

Pour que le système réponde peu à l'excitation, il faut que la fréquence de résonance soit plus basse que les fréquences que nous utiliserons pour les déposes.

3.2.3 Bande passante mécanique du piézo

Un piézoélectrique est aussi un système mécanique .Le modèle est un simple ressort avec une masse. Le ressort étant le piézoélectrique en compression et la masse la plaquette de silicium.(figure 12)

Cependant, le piézoélectrique participe au mouvement. Il faut donc rajouter une partie de la masse du piézoélectrique à la masse en mouvement. Cette fraction peut être considérée comme le tiers de la masse totale de celui-ci[4].

Pour calculer la fréquence de résonance de ce système, il suffit d'appliquer :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}} \quad (16)$$

où k est à calculer

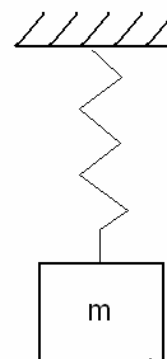


Figure 12: Modèle mécanique d'un piézo

Calculons la raideur k du ressort :

On a pour un ressort :

$$F = k \Delta l \quad (17)$$

Et pour une compression :

$$F = \sigma S \quad (18)$$

où S est la surface et σ la contrainte

D'autre part, la contrainte peut être écrite :

$$\sigma = E_{\text{Young}} \epsilon = E_{\text{Young}} \Delta l / l \quad (19)$$

où ϵ est le déplacement relatif

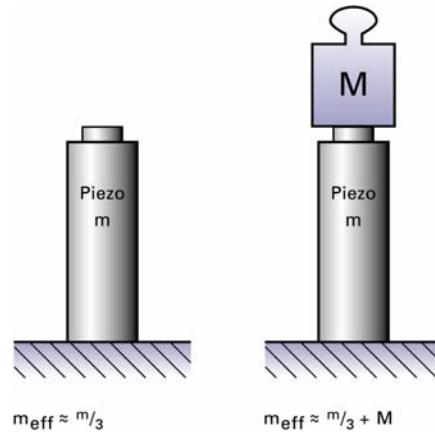


Figure 13: Masse effective en mouvement

En combinant ces trois équations, on obtient :

$$k = E_{\text{Young}} S / l = 800 \cdot 10^6 \text{ [N/m]} \quad (20)$$

La masse équivalente vaut, d'après le tableau 3 et la figure 13.

$$m_{\text{eff}} = 0.0326$$

Et donc:

$$f = 790 \text{ [kHz]}$$

3.2.4 Atténuation du mouvement du piézoélectrique

Si l'on excite un piézo sans appui son mouvement est symétrique par rapport à son centre de gravité, c'est-à-dire que les parois ne se déplacent effectivement que de la moitié de la course totale du piézo (figure 14).

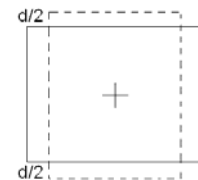


Figure 14 Mouvement d'un piézo libre

D'un autre côté, si le piézoélectrique est appuyé contre quelque chose qui ne bouge pas, tout le déplacement sera transmis à la face libre.(figure 15)

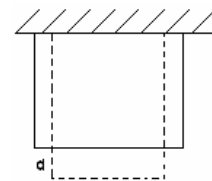


Figure 15 : Mouvement d'un piézoc en butée

Notre cas est le cas intermédiaire. Pour trouver un modèle pour estimer le déplacement, nous cherchons le centre de gravité du système piézo et une partie de la poutre pour définir le déplacement de la paroi libre par analogie avec le cas d'un piézo libre (centre de gravité au centre du piézoélectrique) et celui d'un piézoélectrique fixé (centre de gravité en dehors du piézo). Nous considérons que le piézo influe sur la moitié de la poutre, c'est-à-dire qu'il

déplacera une masse correspondant à la moitié de la poutre. Ce choix est arbitraire mais paraît plausible. En calculant le centre de gravité du système, on déterminera combien se déplace la face libre du piézo.

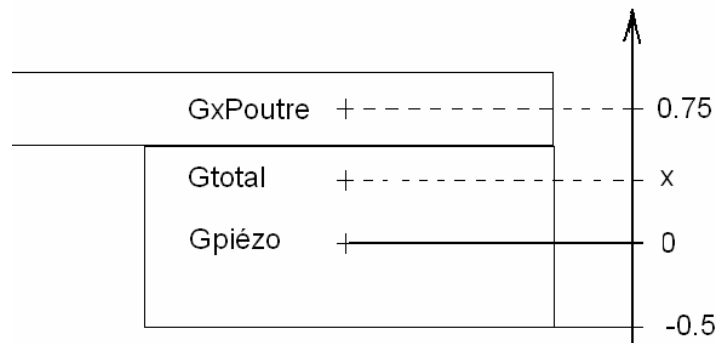


Figure 16: Schéma pour le calcul du centre de gravité du système

Calcul de la position du centre gravité du système (figure 16) :

$$G_{\text{total}} = \frac{m_{\text{poutre}} / 2}{m_{\text{piézo}} + m_{\text{poutre}} / 2} (Gx_{\text{poutre}} - G_{\text{piézo}}) = 0,3[\text{mm}]$$

Ainsi le centre de gravité du système est à 0,8 [mm] du la surface du gripper et donc 80% du mouvement est appliqué à la surface libre du piézo où est attrapée la bille. Ce n'est donc pas le cas optimal car on perd 20% de mouvement ou d'accélération.

3.2.5 : Résumé des bandes passantes

Les bandes passantes peuvent être regroupées en 2 catégories :

- Passe haut :
 - Bande passante mécanique du système poutre-piézo-gripper
 $f_0 = 1.37 [\text{kHz}]$
- Bandes bas :
 - Bande passante mécanique du piézo
 $f = 790 [\text{kHz}]$
 - Bande passante électrique
 $f_{\text{élec}} = 817 [\text{MHz}]$

En considérant encore une atténuation de 20% due au mouvement du piézoélectrique et de la poutre, on obtient un système passe bande :

- fréquence de coupure inférieure
 - $f_{\text{min}} = 1.17 [\text{kHz}]$
- fréquence de coupure supérieure
 - $f_{\text{max}} = 790 [\text{kHz}]$
- atténuation de 20% dans la bande passante

3.2.6 Paramètres géométriques importants et améliorations

Pour le design d'un nouveau préhenseur, il faudra se baser sur l'étude des bandes passantes pour améliorer les performances :

1. Pour ne plus avoir d'atténuation, il suffit d'avoir une poutre assez lourde pour que le centre de gravité du système se trouve dans la poutre

2. Pour la bande passante mécanique du piézoélectrique, il faudrait diminuer la masse de celui-ci (la masse de la plaquette de silicium est très petite par rapport à celle du piézoélectrique). En diminuant sa taille, cela améliore le point 1. aussi.

3. La bande passante électrique n'est pas limitante. Cependant, en diminuant la taille du piézoélectrique (2.) cela modifie la fréquence de coupure. La diminution de la surface a une influence positive sur la bande passante contrairement à la diminution de l'épaisseur. Cependant, en effectuant une homothétie du piézoélectrique actuel, la diminution des dimensions augmentera la fréquence du coupure électrique.

Ce nouveau design est indispensable si de plus petits objets veulent être manipulés.

3.3 Modèle

Maintenant que l'on connaît les matériaux utilisés, les différentes forces entrant en jeu peuvent être calculées.

Les forces d'adhésion peuvent être résumées dans le tableau suivant en utilisant l'équation (2) :

	Polystyrène 50 [μm]	Pollen 40 [μm]
Verre gripper	36	2
Verre substrat	15	12
Verre coaté	11	9
Si	101	83
Poids	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$

Tableau 6 : Forces d'adhésion entre nos matériaux et poids des billes

Nous constatons donc que le poids est d'au moins 3 ordres inférieur aux forces d'adhésion. Dès lors, le négliger est possible sans fausser le modèle.

3.3.1 Prise

L'équation (6) qui détermine si la prise est possible devient en négligeant le poids des billes :

$$\frac{F_{BG}}{F_{BS}} > 1 \quad (21)$$

Soit, en utilisant le modèle des forces d'adhésion de l'équation (2) :

$$\frac{3/2 \pi R W_{BG}}{3/2 \pi R W_{SB}} = \frac{W_{GB}}{W_{BS}} = \frac{2 \sqrt{\gamma_G \gamma_B}}{2 \sqrt{\gamma_B \gamma_S}} = \sqrt{\frac{\gamma_G}{\gamma_S}} > 1 \quad (22)$$

L'équation (22) montre que le seul paramètre qui puisse changer la prise est le choix d'un bon couple de matériaux entre le gripper et le substrat. Plus le rapport est élevé meilleure est la prise.

Dans notre cas, calculons la racine du rapport des γ :

	Verre substrat	Verre coaté
Si	6.8	8.8
Verre Gripper	2.38	3.07

Tableau 7: Racine du rapport des énergies de surface

3.3.2 Dépense

Excitation sinusoïdale :

La dépense se fera pour une large part avec des excitations sinusoïdales. Comme dans le cas de la prise, l'équation (9) peut être simplifiée en négligeant le poids de la bille. On obtient :

$$a > \frac{9W}{8R^2 \rho} \quad (23)$$

Il devient donc aisé de calculer l'accélération théorique limite à laquelle on a une dépense. Pour nos différents matériaux :

	Silicium	Verre gripper
Polystyrène	92'000 [m/s ²]	32000 [m/s ²]
Pollen	2830'00 [m/s ²]	98800 [m/s ²]

Tableau 8: Accélération théorique pour la dépense

Dans le cas de notre gripper, un piézoélectrique est utilisé pour créer une accélération. Celle qui nous intéresse est caractérisée par son d_{33} . Les dimensions sont de 4*3 mm² pour une épaisseur de 1mm.

L'accélération fournie par un piézoélectrique peut être décrite par l'équation (24) [3] :

$$a = \Delta z w^2 = U d_{33} (2\pi f)^2 \quad (24)$$

où Δz est le déplacement du piézoélectrique et U la tension appliquée à ses bornes.

Ainsi, pour une accélération limite que nous venons de calculer, nous pouvons déterminer la fréquence minimale pour la dépense de bille :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{U d_{33}}} \quad (25)$$

Dans le cas de nos matériaux :

	Silicium	Verre gripper
Polystyrène	227000 [Hz]	134000 [Hz]
Pollen	400000 [Hz]	235000 [Hz]

Tableau 9: Fréquence de dépense théorique

Cependant, il convient d'ajuster cette fréquence à nos diverses considérations d'atténuation du signal due entre autre à l'atténuation du mouvement du piézo et des bandes passantes. Le résumé ce fait dans un graphe qui représente l'accélération dans le modèle idéal et dans notre cas en fonction de la fréquence :

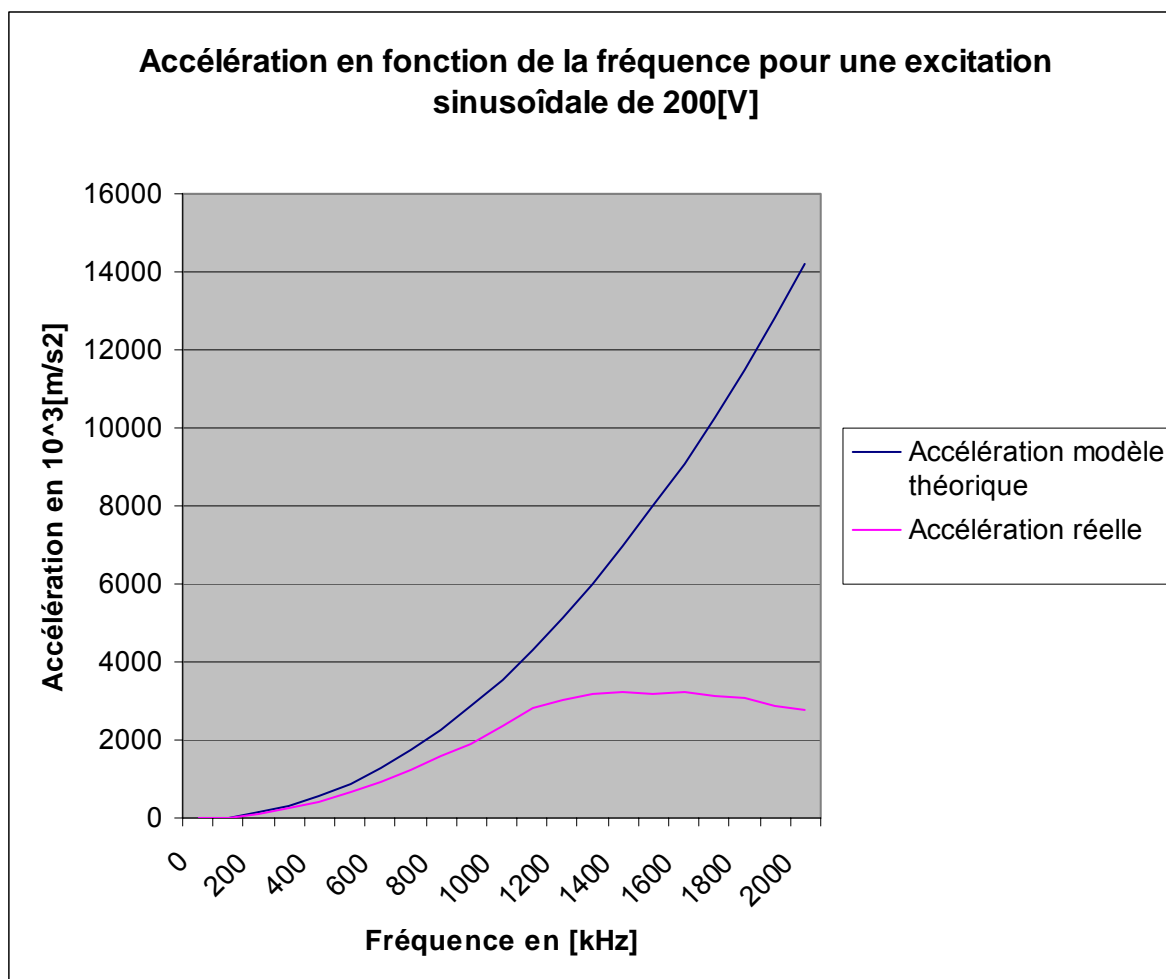


Figure 17 : Accélération du piézo en considérant l'effet passe bas de l'ampli

Dans ce graphe, l'influence de l'effet passe-bas de l'amplificateur de fait bien ressentir, avec le plafonnement de l'accélération et finalement même sa diminution avec la fréquence.

Voici le même graphe en considérant les bandes passantes calculées dans le chapitre 3.2.

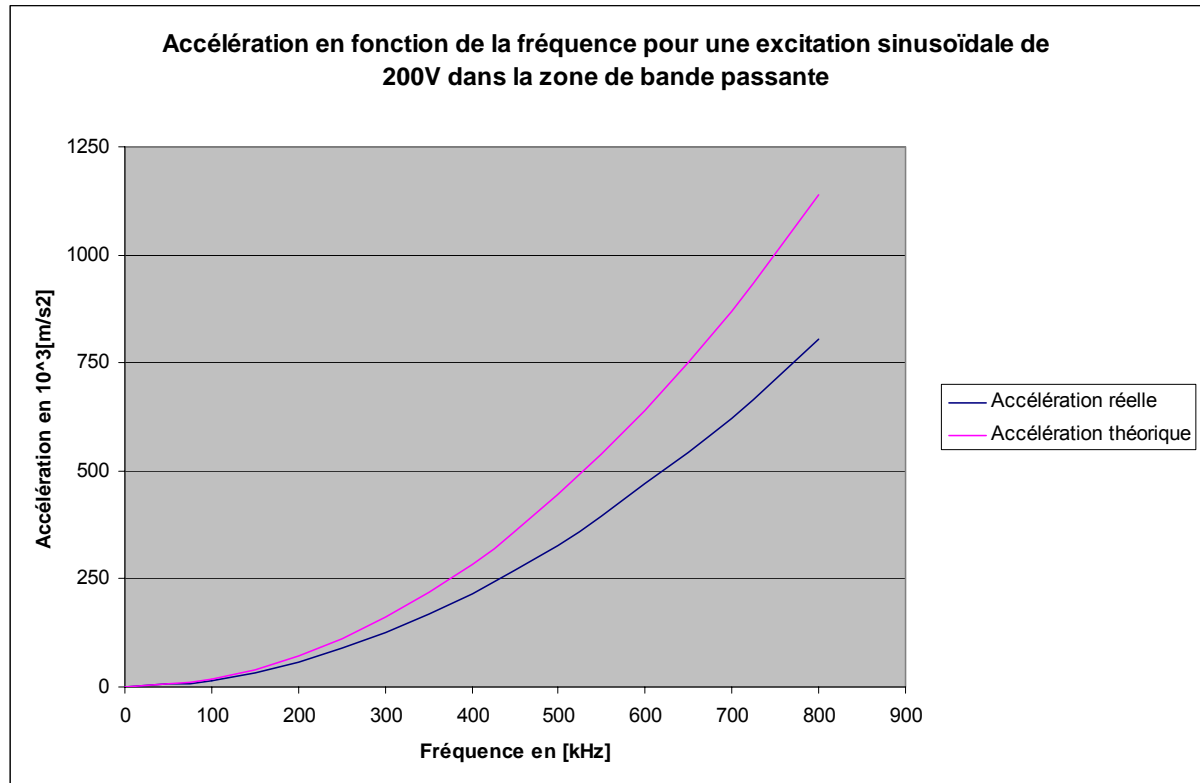


Figure 18: Accélération en considérant les bandes passantes du système et l'effet passe bas de l'ampli

Il convient donc d'ajuster quelque peu les fréquences d'excitation par rapport à la fréquence théorique. Il suffit d'augmenter la fréquence d'excitation d'environ 20% pour obtenir l'accélération recherchée :

	Si	Verre gripper
Polystyrène	272000 [Hz]	161000 [Hz]
Pollen	480000 [Hz]	282000 [Hz]

Tableau 10 : Fréquence de dépose avec notre installation

Excitation carrée :

Pour avoir une accélération plus grande, nous avons aussi fait nos expériences avec des excitations carrées. Il n'existe pas de formule analytique pour donner l'accélération fournie par notre système. En effet, si l'on oublie les différentes bandes passantes et imperfection du générateur de fonction et de l'amplificateur, l'accélération serait infinie.

Pour la mesurer, le signal aux bornes du piézoélectrique a été mesuré. Dans le rapport, seul le cas d'une excitation à 20 [kHz] est étudié ; dans l'annexe 1 se trouve l'étude à d'autres fréquences.

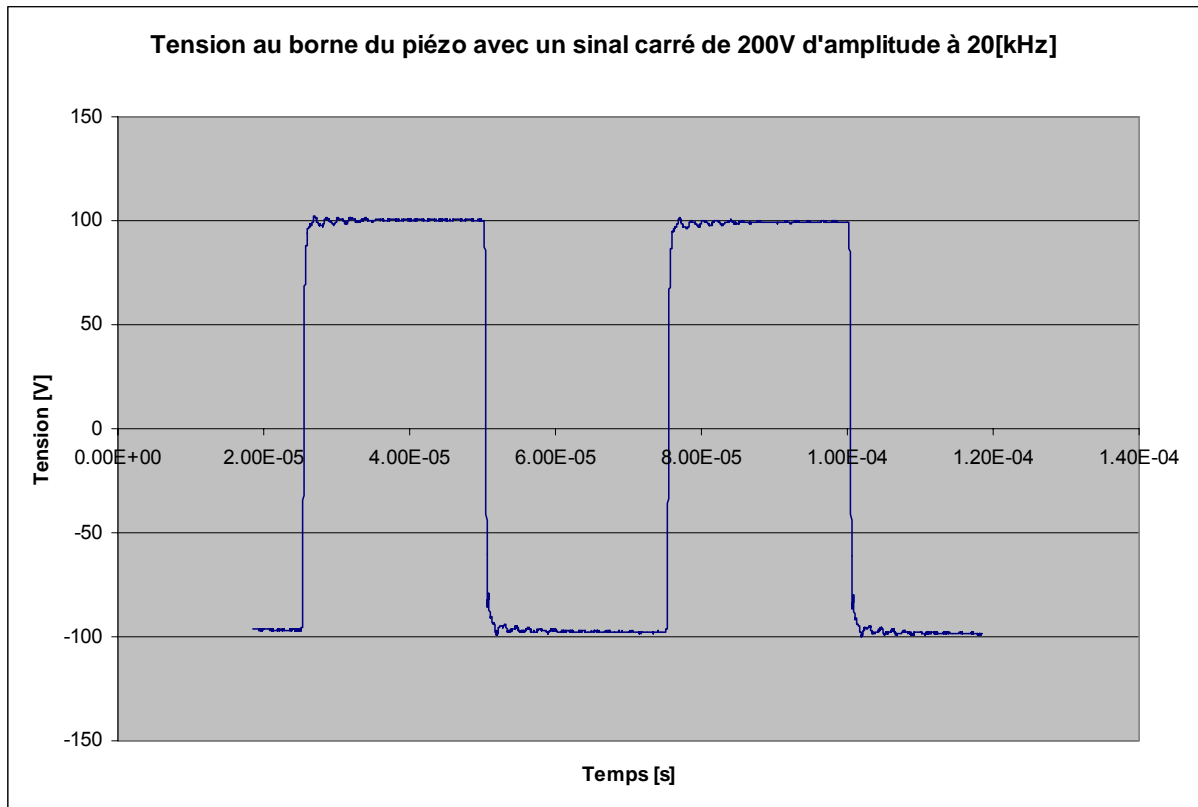


Figure 19: Signal carré de 20[kHz] mesuré à la sortie de l'ampli

En considérant maintenant que le piézoélectrique est capable de suivre le signal, son déplacement vaut :

$$d = U \cdot d_{33} \quad (26)$$

Finalement, pour calculer, l'accélération fournie il reste à dériver la position deux fois. Pour le faire, une méthode d'approximation numérique est utilisée :

$$f''(n) = \frac{f(n-1) - 2f(n) + f(n+1)}{h^2} \quad (27)$$

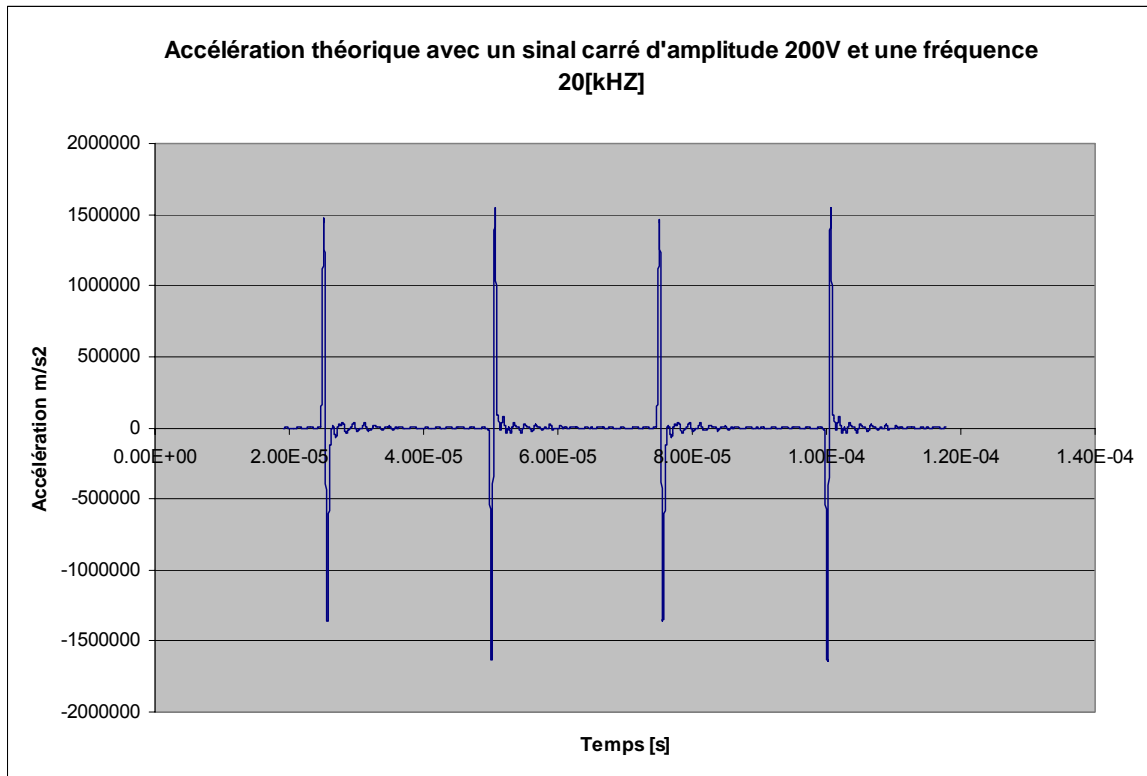


Figure 20: Accélération calculée pour un signal carré de 20[kHz]

Dans ces deux graphiques (figure 19-20), il ressort nettement les pics d'accélération caractéristiques de l'excitation carrée.

L'étude ne sera pas poussée plus loin en regardant ce qu'il se passe avec les bandes passantes du système. En effet, le système ne donnera jamais de telles accélérations. Par contre, cette petite étude montre que pour un excitation carrée même de basse fréquence, le piézoélectrique donnera la plus grande accélération qu'il puisse faire.

4 Caractérisation

La partie d'expérimentation est la plus importante du projet, Elle consiste à tester et caractériser la méthode de prise par adhésion et de dépose par inertie au travers des différentes solutions proposées durant le projet et conditions d'expérimentation

4.1 Conditions d'expérimentation

Les conditions externes des expériences sont très importantes pour caractériser nos manipulations, car des paramètres comme la température et surtout l'humidité sont des acteurs principaux dans les forces d'adhésion.

4.1.1 Air ambiant

La quasi-totalité des expériences ont été effectuées dans de l'air ambiant. Les conditions ont été stables durant le semestre :

- température : 20-22 degrés
- humidité relative : 19-23 %

Les expériences se sont déroulées de novembre à février. Par contre si des expériences identiques avaient été faites durant l'été, les résultats auraient été différents car l'humidité aurait été supérieure à 30%.

4.1.2 Azote

L'expérimentation dans l'azote a pour seul but de diminuer l'humidité dans l'air.

- température : 20-22 degrés
- humidité relative : 2-4 %

L'intérêt principal est de diminuer les forces de cohésion entre les différents matériaux en diminuant au maximum le ménisque d'eau se créant au contact. Il devrait en découler une dépose plus facile, c'est-à-dire nécessitant moins d'accélération.

En ce qui concerne la prise, il devrait ne pas avoir de différence car seule la nature du substrat et du gripper entre en jeu dans notre modèle.

4.1.3 Propreté des surfaces

La propreté des surfaces est un point critique pour assurer de bonnes manipulations. Malheureusement, il nous était impossible de caractériser la propreté de nos matériaux. Pour essayer de travailler avec la plus grande des propretés, Les différentes surfaces sont nettoyées après chaque séance à l'isopropanol. Les raisons pour lesquelles nous n'effectuons pas les nettoyages directement avant les expériences sont d'une part un petit temps pour que l'isopropanol s'évapore et d'autre part que même en attendant une ou 2 heures les prises étaient encore impossibles, pour une raison que nous n'avons pu déterminer.

Un autre souci dans l'état des surfaces est que même si le gripper et le substrat étaient propres, les billes ne l'étaient pas forcément. Il est bien évidemment très difficile de nettoyer des billes d'une taille de 50 microns. Nous avons tout de même fait une tentative mentionnée plus loin pour le faire mais le résultat était moins bon qu'en ne les nettoyant pas.

Il est aussi fort probable que la propreté se détériore au fil des expériences. En effet, en manipulant beaucoup de billes dont nous ne connaissons pas la propreté, le gripper a de forte chance d'être lui aussi sali par ces mêmes billes.

D'autres sources de pollutions ont été identifiées :

-l'homme : il est le plus grand pollueur se la place de travail. Pour diminuer son impact sur les expériences, l'installation bénéficie d'une boîte pour fermer l'environnement. De plus toute la manutention s'effectue avec des gants.

- Outil pour poser les billes sur le substrat : cet outil est un cure-dent en bois. Il est possible que ce bois soit légèrement gras et salisse nos billes. Par contre sous aspect pratique nous a tout de même motivé son utilisation.

4.1.4 Electrostatisme

Un autre paramètre difficile à contrôler est l'électrostatisme. L'idéal serait de n'avoir aucune interaction de type électrique entre nos différents matériaux. Pour ce faire, il faudrait avoir essentiellement des matériaux conducteurs mis à la masse, ce qui n'est pas le cas, d'une part car nous avons des matériaux isolants comme le verre et d'autre part car il n'est pas possible de mettre les billes à la masse.

Dès raison de penser que des charges se forment sur certaines surfaces viennent d'une part du fait que le piézoélectrique peut être assimilé à une capacité que l'on charge et décharge ce qui peut influencer son entourage et d'autre part par l'expérience qui nous a fait constater dans un des cas un comportement clairement électrostatique.



Photo 4 : Ionisateur

Pour lutter contre ce phénomène, nous disposons d'un ionisateur (photo4) qui envoie des charges dans l'air. Dans la mesure où il n'est pas possible de déterminer la polarité des charges ni où elles se trouvent dans notre zone de manipulation, l'ionisateur envoie à part égale des charges positives et négatives dans l'air.

Il est à noter que cet appareil n'a été utilisé qu'une fois dans des conditions où il paraissait évident qu'il existait un problème d'électrostatisme, notamment avec des vibrations des billes et une chute orientée toujours du même côté et surtout caractérisée par une précision plus que médiocre.

L'appareil n'a pas été utilisé systématiquement, car son influence est difficile à gérer. En effet, l'envoi de charges peut très bien provoquer la création d'autres charges sur notre matériel et aussi provoquer des forces indésirables.

4.2 Tests préliminaires

Les premiers tests exécutés directement sur le prototype disponible avaient pour but de se rendre compte des améliorations nécessaires à une bonne qualité de prise et dépose.

Les tests ont été exclusivement fait dans l'air, le gripper utilisé est celui présenté dans le chapitre 3.1.3 avec la plaquette de silicium comme surface de contact. Le substrat est un verre coaté qui est fixé de manière rigide à l'installation (figure 17).

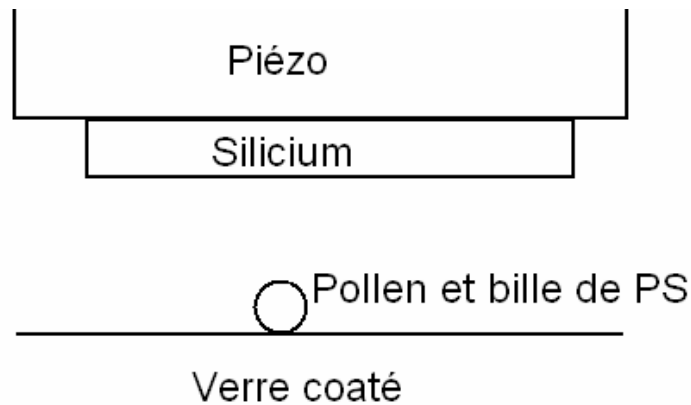


Figure 21: Schéma représentant les tests préliminaires

Ces tests se déroulent selon les étapes suivantes :

- mise en contact de la surface de silicium avec la bille
- prise de la bille
- remontée du gripper
- excitation en commençant avec une fréquence basse puis en montant la fréquence par pas de 10[kHz]
- dépose à une certaine fréquence

4.2.1 Test avec des billes de polystyrène

Prise :

La qualité de la prise est très médiocre car il n'était presque pas possible d'attraper une bille. Cela marchant dans le 20% des billes. De plus, il y avait des limitations présentées ci-dessous :

- Le substrat et la plaquette de Si ne sont pas parallèles (figure 18.1)
- Le Gripper mesure 3×1 [mm²], ce qui est énorme par rapport à nos billes de 50[μm]. Sa surface n'est donc pas parfaitement plane, ce qui ne permet pas d'attraper la bille qu'on veut (figure 18.2).

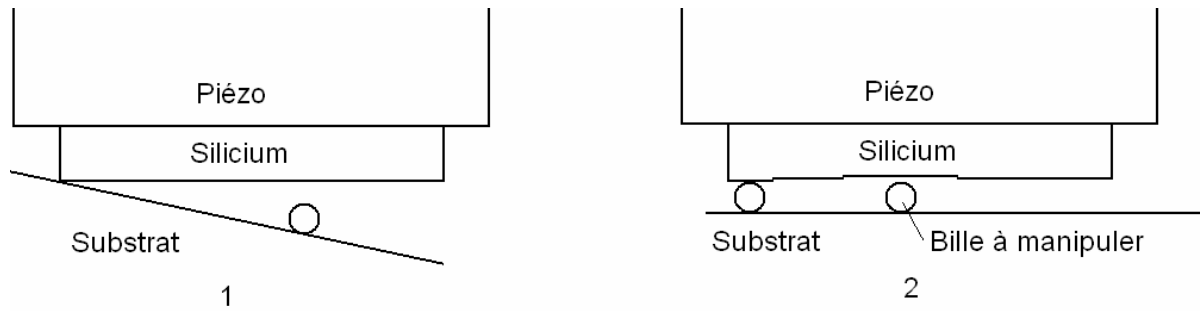


Figure 22: Problèmes de prise

- Le substrat est une plaque de verre rigide. Quand on essaie d'attraper une bille, elle s'écrase.
 - o d'une part car il n'est pas possible de se rendre compte exactement quand il y a contact (problème de focalisation des caméras) donc on va toujours trop loin pour être sur du contact.
 - o d'autre part car la prise n'était possible qu'en écrasant les billes

Dépose :

La dépose a aussi rencontré de grands problèmes. Les excitations sinusoïdales bien plus intéressantes au niveau du contrôle de l'accélération n'ont jamais suffi à déposer une bille. Dès lors l'utilisation de signaux carrés a été nécessaire. Du coup, l'accélération nécessaire à la dépose, est beaucoup plus grande que l'accélération théorique, là encore la raison est dans l'écrasement des billes. En effet, le modèle est considéré pour une surface de contact minimale, dès lors, si les billes sont déformées la surface augmente et donc aussi les forces d'adhésion.

Dans un premier temps les tests ont été effectués avec les billes de polystyrène. Le but était de déterminer un seuil en fréquence de la chute des billes. Les résultats sont consignés dans la figure 23 :

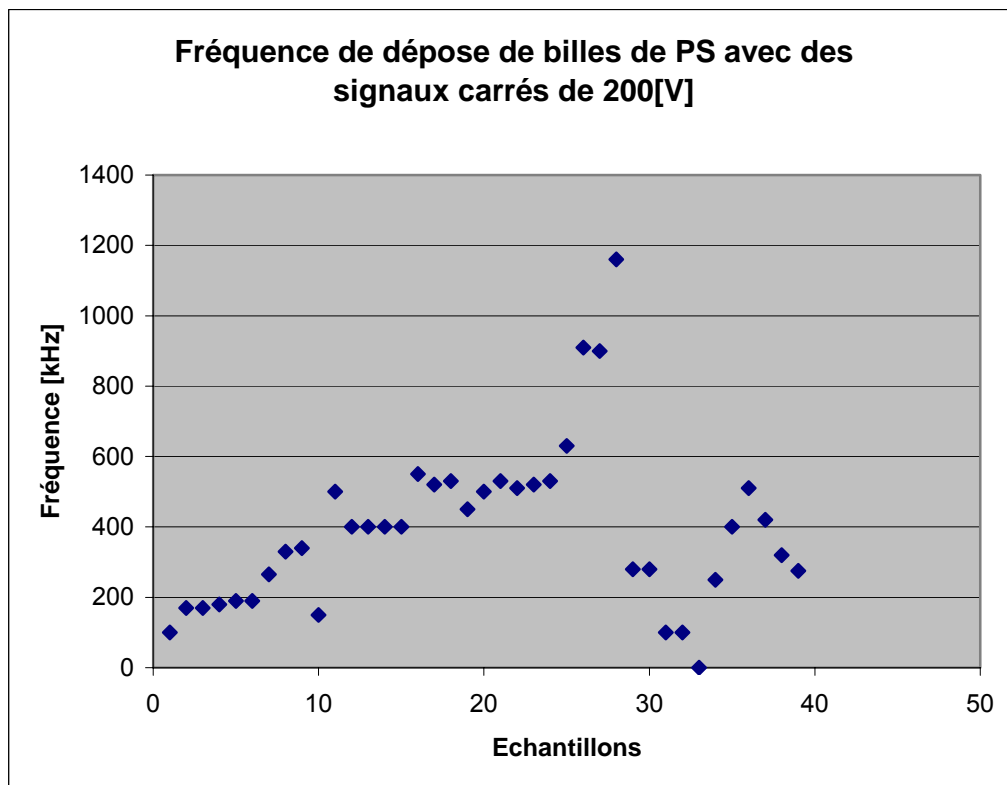


Figure 23: Graphe représentant la fréquence de dépôt de billes de PS avec des excitations carrées

L'échelle du tableau pourrait laisser croire qu'une dépose a été faite sans excitation. En fait elle a été réalisée à très basse fréquence.

On note dans ce tableau qu'il n'y a pas un vrai seuil de fréquence, mais que 90% des billes tombent en dessous de 600[kHz]. Ce phénomène découle du fait que comme étudié plus haut toutes les excitations carrées donnent le maximum d'accélération que peut fournir notre piézoélectrique, eu d'autre termes l'accélération fournie est indépendante de la fréquence d'excitation. Il reste tout de même à déterminer pourquoi toutes les billes ne tombent donc pas à la fréquence la plus basse. Deux explications ont été envisagées :

- la fréquence augmentant, le piézoélectrique chauffe et ainsi chauffe aussi le gripper.

L'humidité au contact gripper-bille tend ainsi à diminuer ainsi que les forces d'adhésion.

- il existe sorte de constante de temps ou d'inertie dans la force d'adhésion qui fait que si on est à la limite de l'accélération bouger souvent fera tombé la bille tandis que bouger peut de fois ne suffira pas. Ce phénomène sera étudié plus loin.

4.2.2 Tests avec des billes de pollen

Pour essayer de s'affranchir de l'écrasement des billes qui fausse la qualité de la prise et de la dépose, des pollens ont été utilisés. Le grand avantage est que l'on peut considérer qu'ils sont creux et ainsi élastiques, soit insensibles (jusqu'à un certain point) à l'écrasement.

Les résultats pour la prise sont meilleurs que pour les billes de PS avec 60% de réussite contre 40% pour les billes de polystyrène.

Par contre la dépose était plus aisée en fréquence :

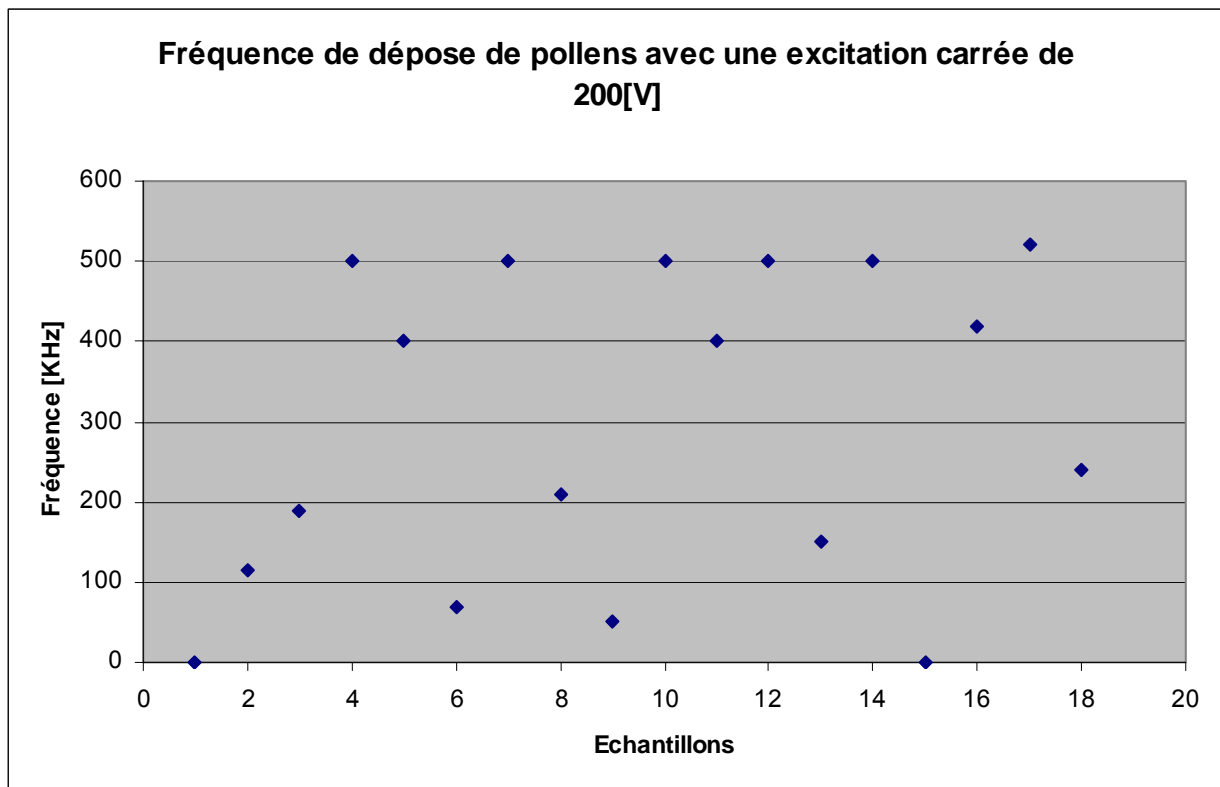


Figure 24: Fréquence de dépose de pollens avec une excitation carrée de 200 [V]

L'échelle du tableau pourrait laisser croire que deux déposes ont été réalisées sans excitation. En fait, les pollens ont été déposés à très basse fréquence.

Dans ce cas, on constate un certain seuil, mais comme les excitations sont toujours carrées, il est difficile d'en tirer des conclusions claires et nous retombons sur les mêmes remarques que le chapitre précédent.

La conclusion que l'on peut tirer de ces deux expériences est que des billes qui ne sont pas écrasées tombent à une fréquence plus basse.

	Pollen	Polystyrène
Seuil de fréquence pour 90% de réussite	500[kHz]	600[kHz]
Seuil de fréquence pour 100% de réussite	520[kHz]	1150[kHz]

Tableau 11: Mesure de fréquence de dépose pour une excitation carrée

4.2.3 Echauffement de l'amplificateur

Durant ces premières expériences, il a été constaté que l'ampli chauffait. La raison est qu'il ne supporte pas de générer des signaux carrés en continu à des fréquences supérieures à 600 [kHz]. La parade est de créer des trains d'impulsions de carré à la fréquence voulu en les espaçant suffisamment pour ne pas surchauffer l'amplificateur. Nous appellerons ce mode burst. Si le train contient une seule impulsion, le mode est appelé impulsion ou single.

Par contre l'utilisation de signaux non continu a mis à jour un phénomène de vibration de la bille sur la surface de contact. En effet, à une fréquence de carré donné, il arrive que la bille vibre en mode burst et que même si on augmente la fréquence elle ne chute pas, alors qu'en continu à la fréquence de vibration initiale la bille est déposée. Les deux raisons possibles

sont toujours les mêmes soit l'échauffement du gripper et la constante de temps ou inertie de la force

4.3 Conclusion des tests préliminaires

Les tests préliminaires ont montré les grands défauts du premier montage :

- la taille de la surface de contact
- l'écrasement des billes

Pour pallier à ces faiblesses des améliorations vont être apportées au premier prototype

Les deux modifications rapides permettent la diminution de la surface de contact :

- Coller un élément de silicium qui mesure 50microns d'épais. L'intérêt est que la taille de cet élément est de l'ordre de grandeur des billes à manipuler



Figure 25 : Collage d'un élément de silicium

- Coller une bille de verre sur le gripper. Les raisons sont les mêmes que dans la première stratégie. Cette solution amène une diversité du type des surfaces du préhenseur.

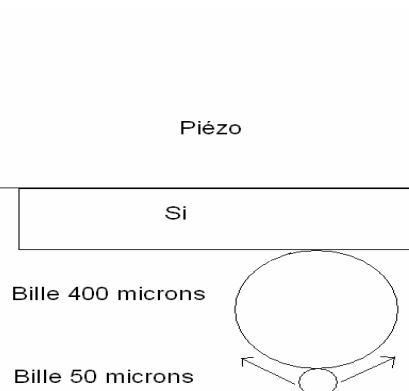


Figure 26: Collage d'une bille de verre

Ce qui est intéressant avec ces deux alternatives est qu'il est possible de les mettre en œuvre simultanément sur le gripper en ajustant la hauteur du substrat et sa position (figure 27).

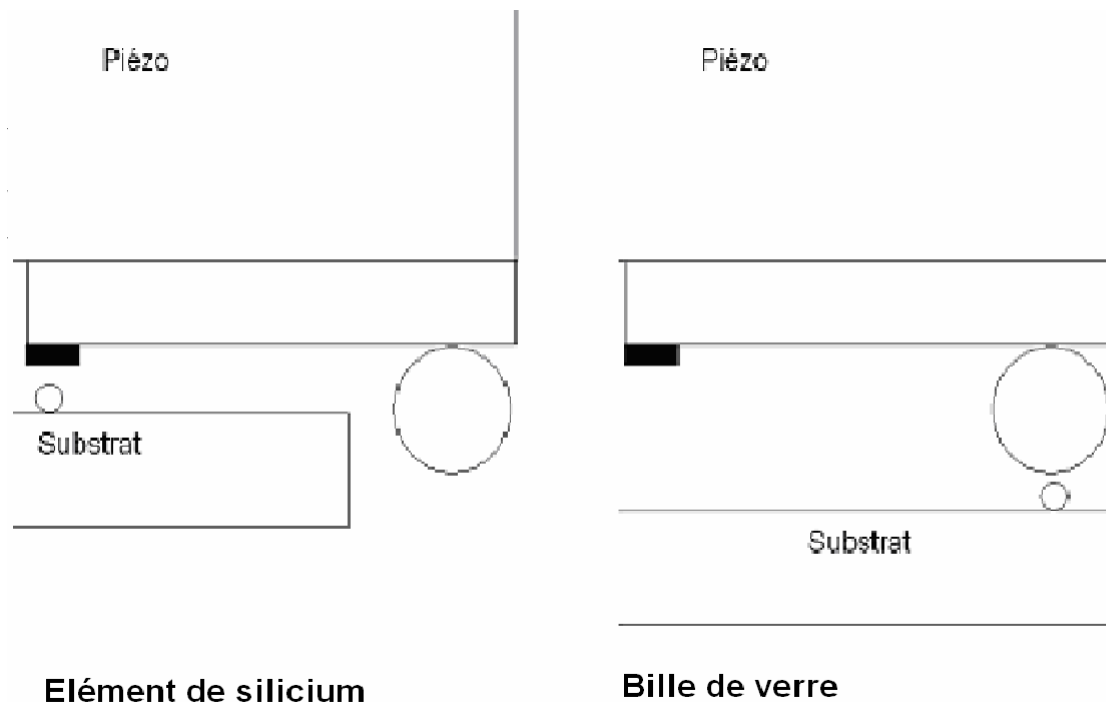


Figure 27: Collage simultané de l'élément de silicium et de la bille de verre

Après des essais la première bille de verre de 400[μm] a été remplacée par une deux fois plus petite pour pouvoir être complètement observée par le microscope du dessous dont le champ de vision est d'environ 300* 400 [μm^2]

4.3.1 Compliance du système

Pour ne pas écraser les billes, un système de compliance est nécessaire. Le placer sur le gripper n'est pas possible car les lames qui seront calculées sont trop faibles pour porter le gripper.

Le système se compose essentiellement de lames qui doivent fléchir lorsque le gripper appuie sur la bille à attraper.

Choix des lames :

La constante de lame est définie par les deux paramètres suivants :

- d'une part on peut considérer que l'on sait qu'il y a contact du silicium avec la bille à environ 10[μm].
- d'autre part la force d'adhésion est d'environ 10[μN]

Nous obtenons donc $k = 10[\mu\text{N}] / 10[\mu\text{m}] = 1 \text{ [N/m]}$

La place occupée par la lame est aussi un facteur déterminant pour le choix. En effet, les différents microscope, caméra et gripper encombrant la surfaces de travail. La longueur totale des lames doit être inférieure à 50[mm].

Le système peut être monté de deux manières, comme le montre la figure 28 et est calculé dans l'annexe 2:

- **simple encastrement** : une longueur de lame suffit par contre, lorsqu'on applique une force, le substrat sera incliné

- **double encastrement** : quatre longueurs de lame sont nécessaires (pour utiliser la même lame que dans le premier cas) par contre le substrat reste toujours à l'horizontale.

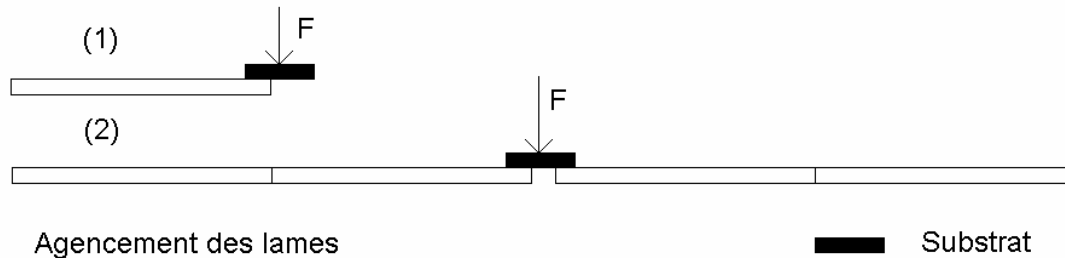


Figure 28 : Simple et double encastrement de lames

Deux agencements des lames ont été envisagés dans un premier temps qui permettent de travailler sur le milieu du substrat avec la vision depuis dessous:

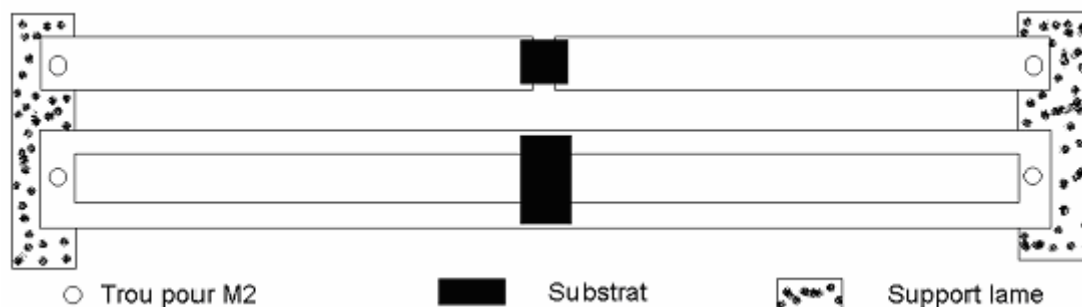


Figure 29: Agencement des lames: vue de dessus

Cependant ces deux agencements posent des problèmes pour les collages des substrats et vu la faible épaisseur des lames, leur partage en deux augmentera de manière critique leur fragilité.

Nous nous attarderont finalement sur deux stratégies plus simples :

- **Une lame simplement encastree.** Ce système est simple et facile à mettre en œuvre. Son inconvénient est que le substrat n'est pas incliné car il subit l'angle du à la flèche de la lame
- **Une lame encastree à ses deux extrémités.** Le substrat est collé au milieu de la longueur de la lame de manière à ce qu'il dépasse sur le côté de la lame. Ce système permet par rapport au premier d'avoir un substrat plat. Son inconvénient est une longueur de lame 4fois supérieur à la lame simple une même raideur pour la même largeur et épaisseur

Pour diminuer le nombre de pièces le support du système de compliance est capable d'accueillir les deux stratégies proposées.

Les 2 lames prises ont les dimensions suivantes, conformément à l'annexe2 ; h représente l'épaisseur, b la largeur et l la longueur:

- Simple encastrement : $h=0.04[\text{mm}]$ $b=4[\text{mm}]$ $l=23.4[\text{mm}]$
- Double encastrement : $h=0.02[\text{mm}]$ $b=4[\text{mm}]$ $l=46.8[\text{mm}]$

Design du support des lames

Le support doit être capable de supporter les 2 lames ce qui ne pose pas de problème. Par contre, l'encombrement du set up avec les caméras et le gripper nécessite une géométrie particulière.

Maintient des lames

Les lames sont guidées par 2 goupilles. On vient ensuite les serrer avec une vis M2. Une pièce qui se dépose sur la lame et qui est vissée aussi assure un bon encastrement des lames.

Dessins de détails et d'ensemble

Les dessins d'ensemble et de détail se trouvent en annexe. Voici juste les dessins des montages, sans les vis ni les goupilles dans les deux configurations :

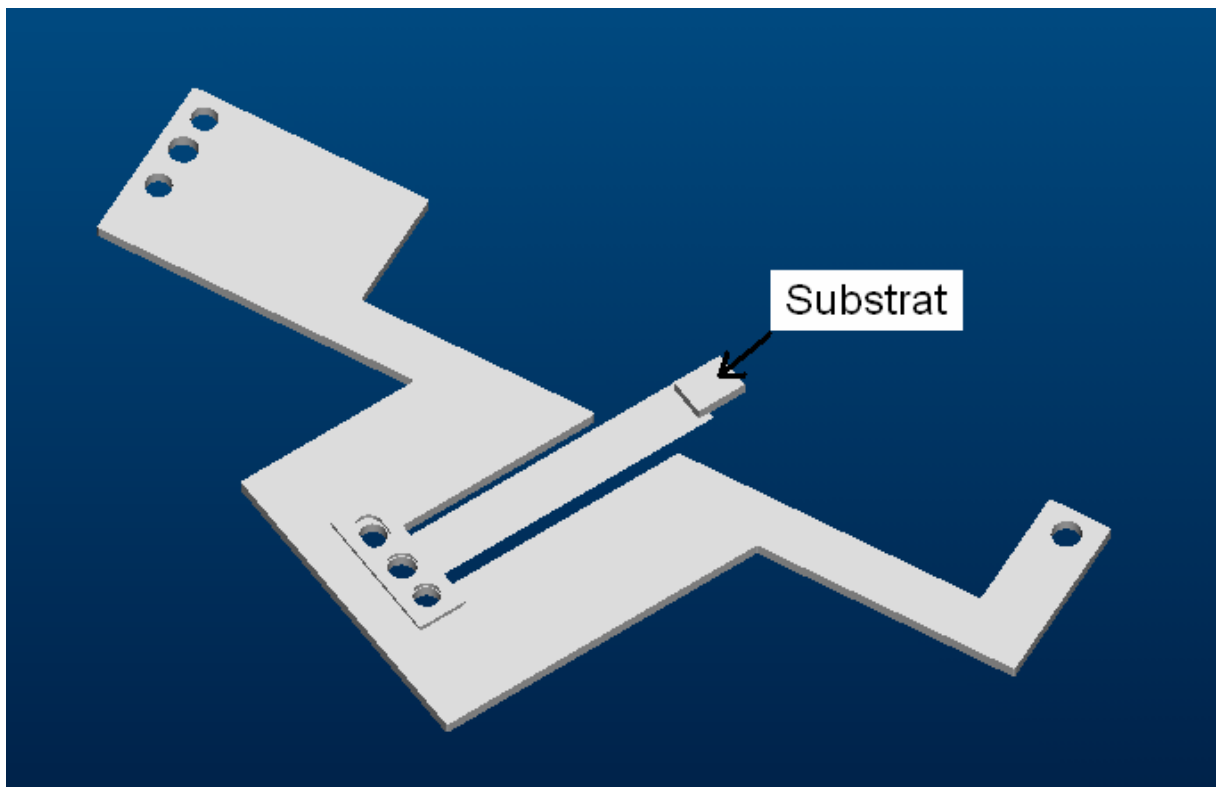


Figure 30: Compliance: lame encastrée

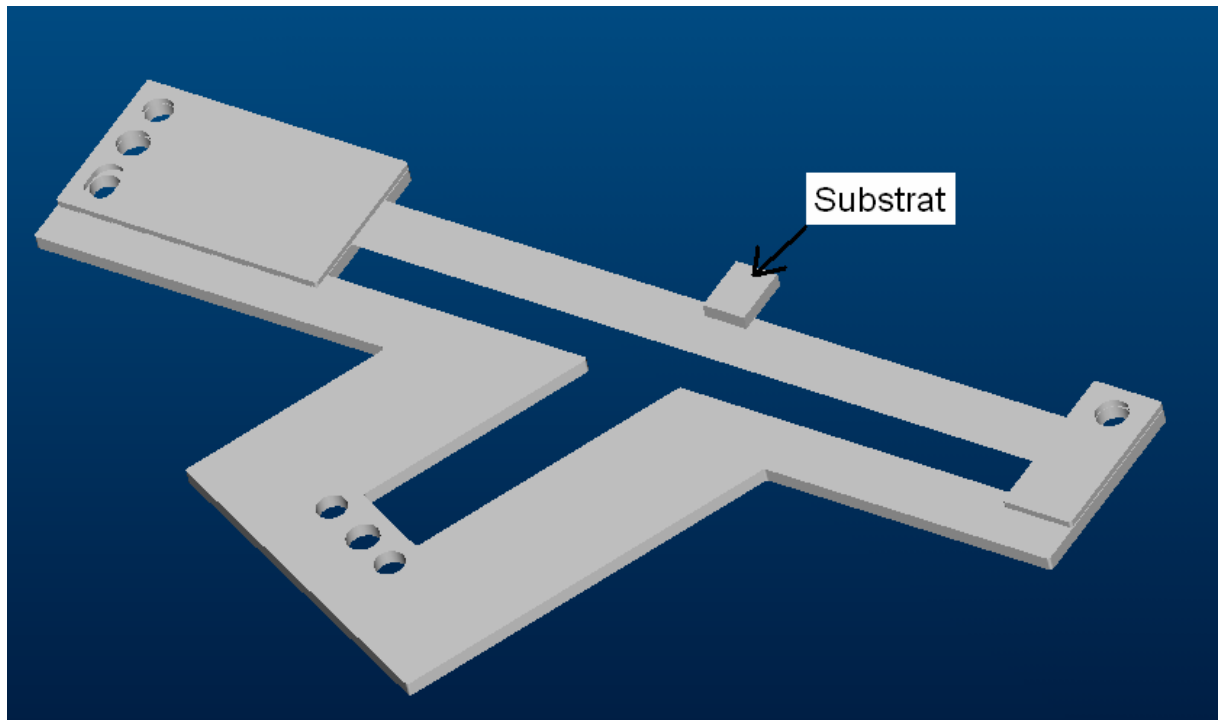


Figure 31: Compliance lame doublement encastrée

4.4 Caractérisation de la prise et de la dépose

Un programme d'expériences a été créé dans le but de caractériser la prise (taux de réussite) et la dépose (seuil d'accélération) de billes de polystyrène dans des conditions différentes :

- air ou azote
- excitation continu ou impulsion
- surface de contact du gripper en silicium ou en verre

	Air		Azote	
Gripper Si	Continu	Impulsion	Continu	Impulsion
Gripper bille Verre	Continu	Impulsion	Continu	Impulsion

Figure 32: Programme d'expérimentation

4.4.1 Caractérisation de la prise

Le nombre d'essais nécessaires à une prise est le nombre de fois que la manipulation descendre le gripper au contact de la bille et remonter pour contrôler si la prise a été réalisée.

Surface de contact en silicium dans l'air

La qualité de la prise a été jugée sur 75 échantillons. Elle a été réussie au premier contact dans 75% des essais et possible en plusieurs essais pour toutes les billes testées.

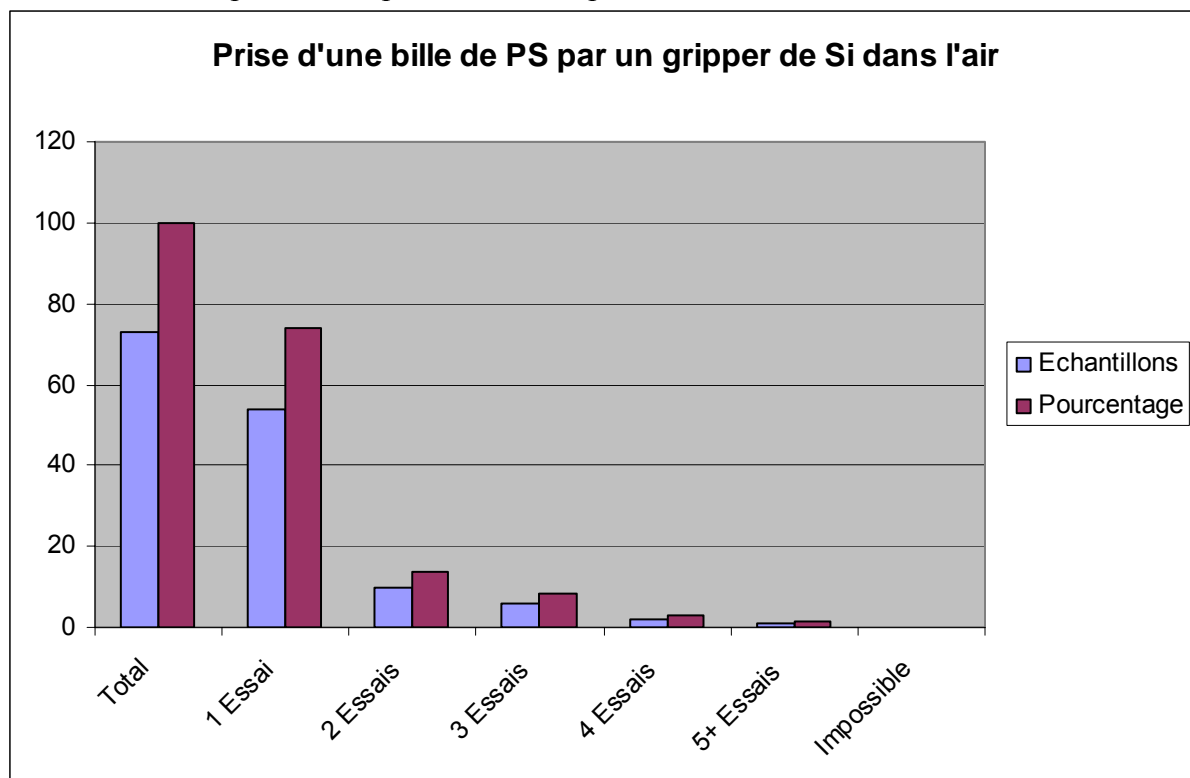


Figure 33: Caractérisation de la prise d'une bille de PS avec un gripper en silicium dans l'air

Surface de contact en silicium dans de l'azote

La qualité de la prise a été jugée sur 70 essais. Plus de 75% des billes ont été attrapées du premier coup et toutes l'ont été en moins de 5 essais. Malgré la baisse de l'humidité, la prise est parfaitement comparable au cas de l'air libre

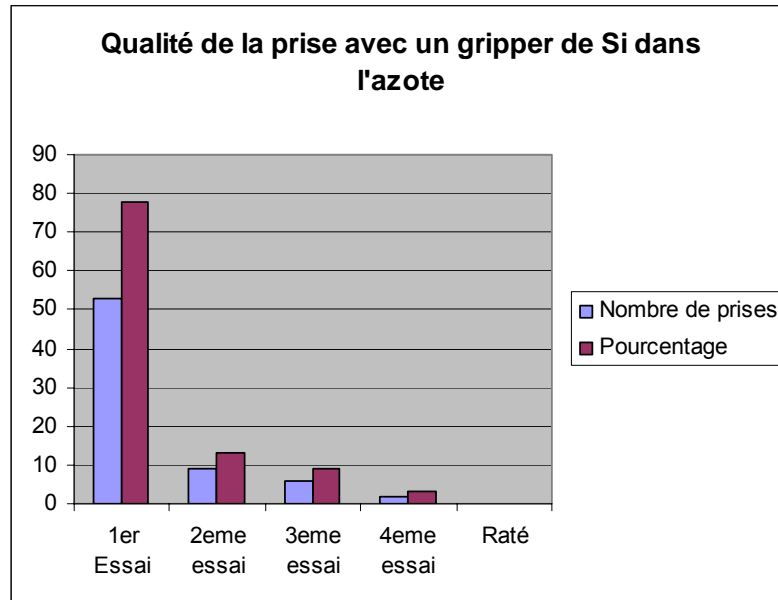


Figure 34:Caractérisation de la prise d'une bille de PS avec un gripper en silicium dans de l'azote

Surface de contact en verre dans l'air

La prise a été caractérisée sur 85 échantillons. Elle a été effectuée du premier coup dans 72% des cas et impossible pour seulement une bille.

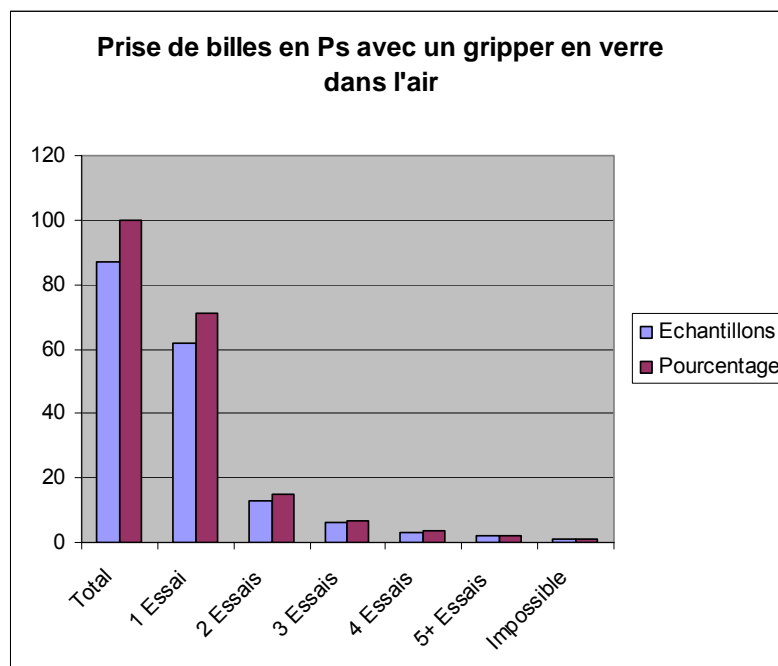


Figure 35 : Caractérisation de la prise d'une bille de PS avec un gripper en verre dans l'air

Surface de contact en verre dans de l'azote

Le nombre d'échantillons est de 140. Par contre la prise en un essai est la plus médiocre avec moins de 55%. Par contre toutes les billes ont pu être prises.

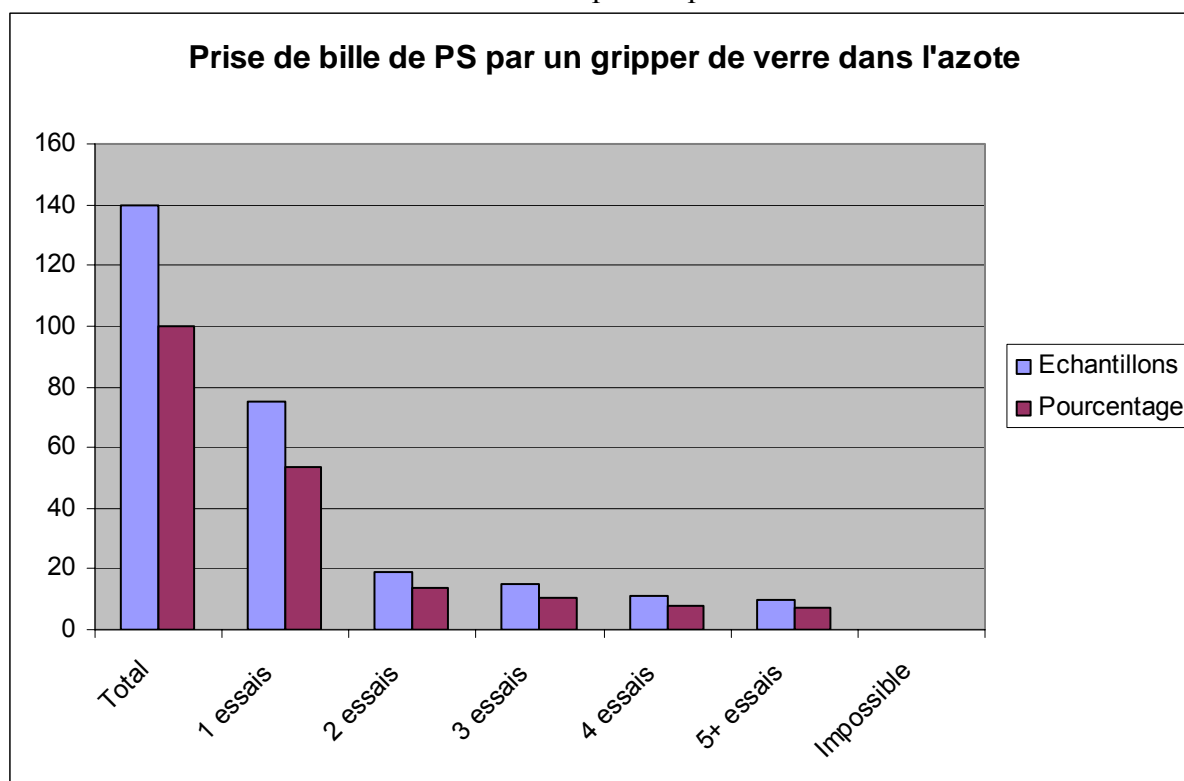


Figure 36 : Caractérisation de la prise d'une bille de PS avec un gripper en verre dans de l'azote

Conclusion de la prise

La qualité de la prise peut être résumée dans le tableau suivant :

	Air	Azote
Gripper en Si	75%	75%
Gripper en Verre	72%	53%

Tableau 12 : Taux de réussite de la prise en un essai

Il faut noter que sur environ 370 prises une seule n'a pas été possible, les autres s'effectuant en cinq tentatives au plus. Cela prouve bien la viabilité d'un tel système pour la prise de micro objets.

L'azote ne modifie pas la qualité de la prise sur le Si. Cela peut s'expliquer par le fait que si l'humidité baisse, la force d'adhésion entre la bille et le substrat baisse et celle entre le gripper et la bille baisse aussi. Cela semble donc égaliser l'influence de l'azote et fonctionner un peu comme des vases communiquant : on baisse la force d'un côté et de l'autre et cela ne change rien à la différence de niveau entre les deux forces.

Ce qui est plus étonnant est que ce phénomène n'est pas remarqué sur le gripper en verre.

L'indifférence de l'humidité avec la surface de silicium pourrait provenir du fait que l'élément collé provient d'un autre gripper cassé et que certains sont recouverts d'un coating hydrophobe. Cependant, il n'y avait aucun moyen de le vérifier.

Quoi qu'il en soit, cette étude confirme l'intuition qui dit que le gripper qui sera d'un matériau avec une plus grande énergie de surface (γ) sera un meilleur préhenseur, dans notre cas le silicium a un meilleur taux de réussite moyen dans les deux environnements.

Remarque :

- il y a des journées où aucune billes ne pouvaient être prises. Cela se passait si je manipulais moins d'une journée après le nettoyage des différentes surfaces
- du type de prise dépend sa qualité (voir 4.6.1)

4.4.2 Caractérisation de la dépose

Les tableaux ci-dessous représentent les mesures de fréquence de dépose de billes de polystyrène.

Les expériences continu-impulsion se feront alternativement pour pouvoir mieux les comparer. En effet, les résultats changent d'une bille à l'autre et d'une journée à l'autre, rendant l'interprétation difficile pour deux séances différentes. L'expérimentation se déroulera donc comme suit :

- Prise->Dépose en impulsion (1 mesure)
- Prise->Dépose en continu (1 mesure)
- Prise->Dépose en impulsion (1 mesure)
- Prise->Dépose en continu (1 mesure)
- Etc.

Clés de lecture des graphiques :

- le mode impulsion sera aussi appelé single.
- l'axe des x représente tant les échantillons que le temps.
- la bande passante du système est à 700[kHz]. Si une bille ne tombe pas à cette fréquence, elle sera consignée dans le tableau avec une fréquence de dépose 1000[kHz] pour bien la démarquer des autres et la faire apparaître dans le tableau.
- si une bille ne tombe pas en impulsion, il sera essayé de la déposer en continu. Cette mesure sera sur la même colonne dans les graphes suivants.
- les blocs dans les tableaux représentent des tests sur une seule même bille

Rappel :

	Si	Verre gripper
Polystyrène	272000 [Hz]	161000 [Hz]

Tableau 13 : Fréquence de dépose de bille de polystyrène en fonction de la surface de contact

Surface de contact en silicium dans l'air

La fréquence de dépose des billes de polystyrène a été mesurée 40 fois en continu et 40 fois en impulsion.

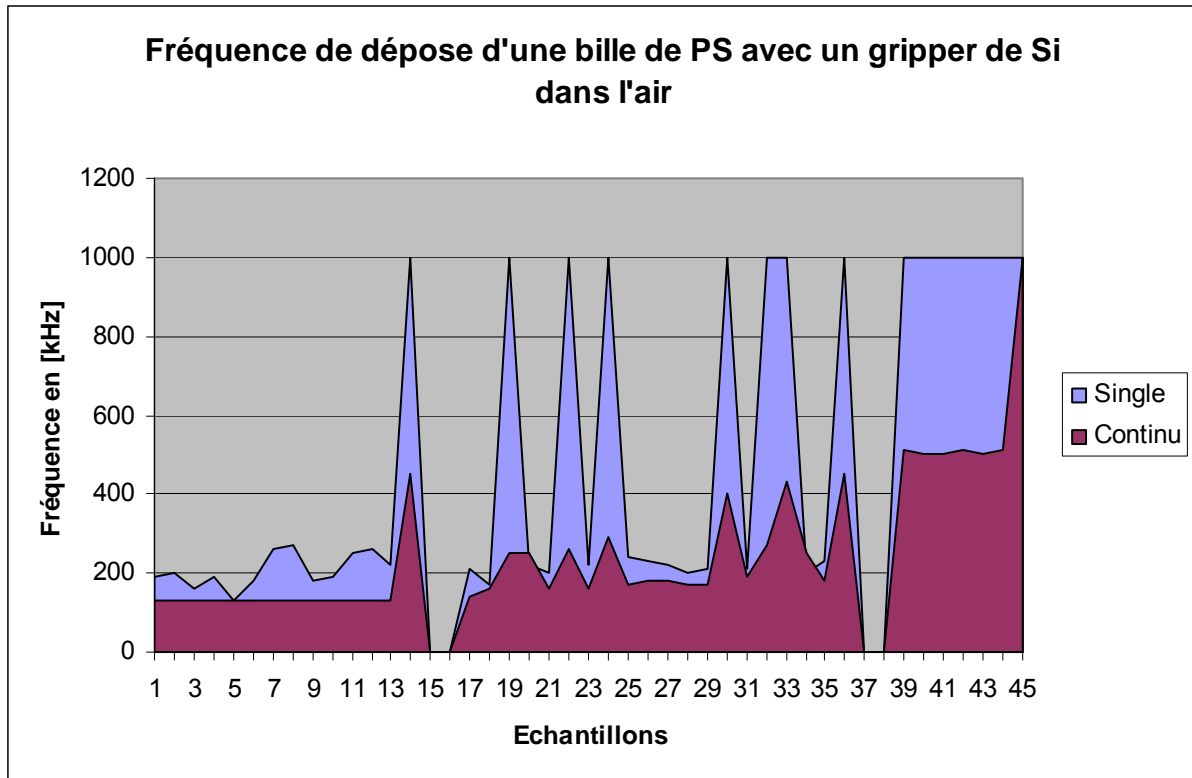


Figure 37 : Caractérisation de la dépose d'une bille de PS avec un gripper en silicium dans l'air

Des seuils peuvent être déterminés pour le cas continu (en faisant abstraction des plus grands pics ou l'on considérera que les forces d'adhésion sont trop conséquentes par rapport aux autre dépose) :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	150[kHz]
Deuxième bille	180[kHz]
Troisième bille	500[kHz]

Figure 38 : Seuil en fréquence de dépose avec une surface de silicium dans l'air en continu

En impulsion :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	240[kHz]
Deuxième bille	240[kHz]
Troisième bille	impossible]

Figure 39: Seuil en fréquence de dépose avec une surface de silicium dans l'air en impulsion

Ce qui est étonnant est que selon le modèle proposé plus haut le seuil devrait se situer à 270[kHz] et on a bien souvent un seuil plus faible.

Surface de contact en silicium dans l'azote

La fréquence de dépose des billes de polystyrène a été mesurée 65 fois par excitation.

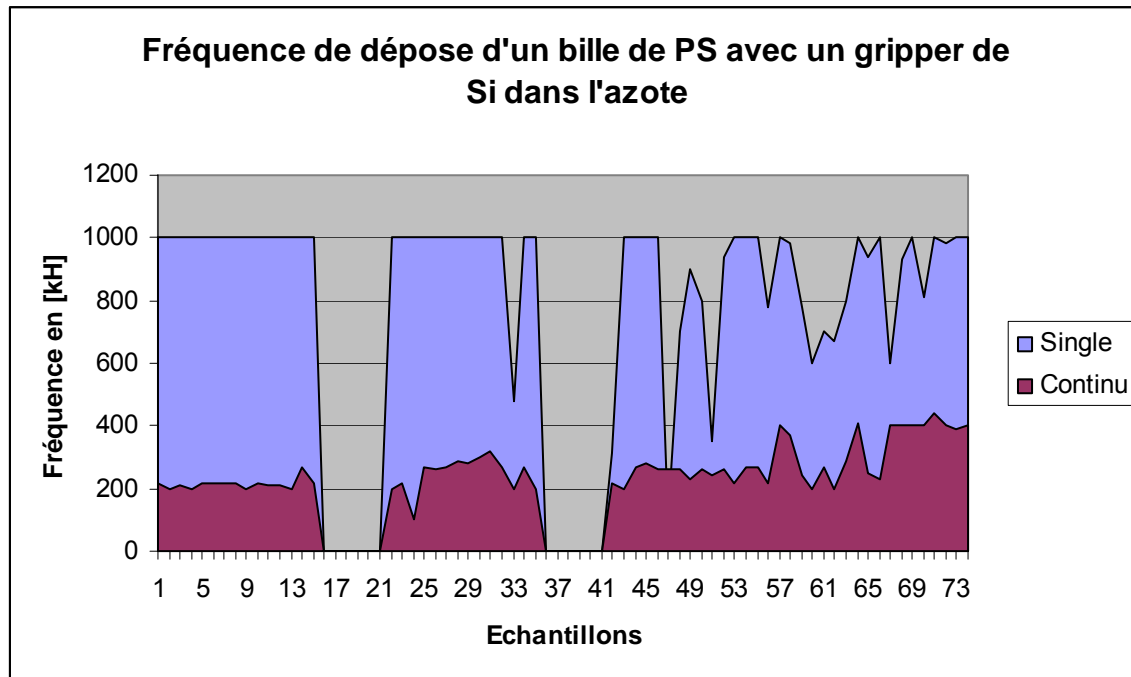


Figure 40 : Caractérisation de la dépose d'une bille de PS avec un gripper en silicium dans de l'azote

Un seuil d'accélération est bien déterminable pour l'excitation continue :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	230[kHz]
Deuxième bille	290[kHz]
Troisième bille	290 puis 400[kHz]

Figure 41 : Seuil en fréquence de dépose avec une surface de silicium dans de l'azote en continu

Ces seuils correspondent déjà mieux au seuil calculé.

Par contre dans le cas de l'excitation impulsion, seul 17 billes sur 65 ont été posées soit seulement 25%.

Remarque : pour les deux premières billes, la fréquence de dépose était augmentée jusqu'à 700[kHz] comme prévu initialement (bande passante et échauffement de l'ampli). Par contre pour la troisième, la fréquence de dépose est augmentée jusqu'à 1[GHz]. Cela expliquerait pourquoi les billes en single ne sont pas déposées pour les premiers échantillons alors qu'elles le sont pour la dernière.

Comme l'excitation était en single pour les plus hautes fréquences, le problème de l'échauffement de l'ampli ne se pose pas.

Surface de contact en verre dans l'air

La caractérisation a été faite sur 44 déposes pour chaque excitation

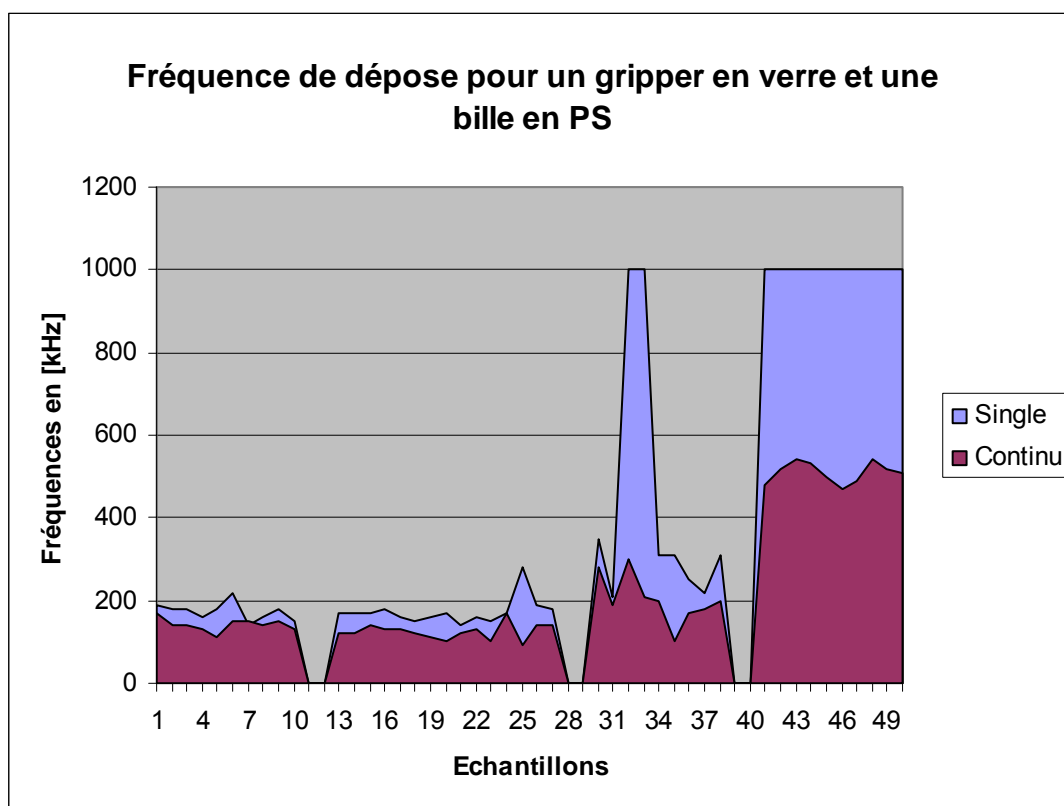


Figure 42 : Caractérisation de la dépose d'une bille de PS avec un gripper en verre dans l'air

Un seuil d'accélération est bien déterminable pour l'excitation continue :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	180[kHz]
Deuxième bille	180[kHz]
Troisième bille	250[kHz]
Quatrième bille	530[kHz]

Figure 43 : Seuil en fréquence de dépose avec une surface de verre dans l'air en continu

Pour une excitation impulsion :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	200[kHz]
Deuxième bille	190[kHz]
Troisième bille	320[kHz]
Quatrième bille	Impossible]

Figure 44 : Seuil en fréquence de dépose avec une surface de verre dans l'air en impulsion

Surface de contact en verre dans de l'azote

La caractérisation de ce cas s'est faite pour 45 échantillons par excitation

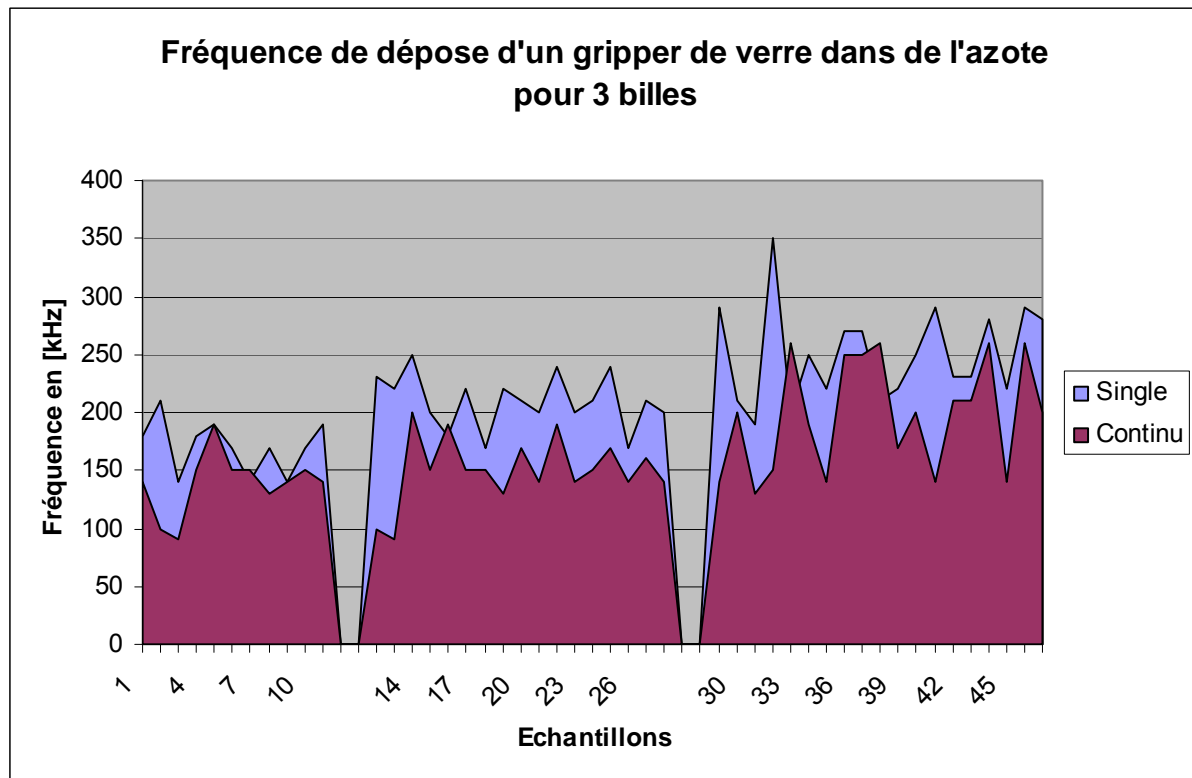


Figure 45 : Caractérisation de la dépose d'une bille de PS avec un gripper en verre dans de l'azote

Des seuils peuvent être déterminés pour le cas continu :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	180[kHz]
Deuxième bille	190[kHz]
Troisième bille	250[kHz]

Figure 46 : Seuil en fréquence de dépose avec une surface de verre dans l'azote en continu

En impulsion :

	Fréquence de dépose (seuil)
Première bille	200[kHz]
Deuxième bille	250[kHz]
Troisième bille	300[kHz]

Figure 47 : Seuil en fréquence de dépose avec une surface de verre dans l'azote en impulsion

Remarques :

- Les fréquences de dépose en dessous de 100[kHz] ont été mesurées directement en allumant l'ampli. Il se peut donc que ce soit le fruit d'une perturbation à l'enclenchement de l'ampli qui les a fait tomber plutôt que le signal en lui-même.
- La figure 45 paraît être beaucoup en dents de scie. Ce n'est pas le cas par rapport aux 3 figures précédentes, c'est juste un effet d'échelle.

Conclusion de la dépose

Ces expériences ont permis de mesurer un seuil de dépose pour les billes. Par contre le seuil pour la dépose est plus bas que prévu en théorie, surtout pour le silicium. Une des raisons possibles est que l'élément de silicium aie été traité (comme c'est un morceau de pince d'un autre gripper c'est très probable, mais il n'est pas possible de le savoir).

La dépose en impulsion nécessite toujours une plus grande fréquence ; les deux courbes sont identiques mais juste décalées en fréquence (sauf dans le cas de la surface de silicium dans l'azote). Cela révèle cette sorte de constante de temps dans la rupture de la force d'adhésion.

Les pics dans la courbe en continu correspondent bien aux billes qui ne sont pas tombées en single. Cela représente donc que dans certain cas les forces d'adhésion sont bien plus fortes que d'autre et donc qu'il reste un paramètre que nous ne contrôlons pas dont la force d'adhésion dépend.

On note encore que la qualité de la dépose évolue de manière négative dans le temps, ce qui est représenté par l'augmentation dans le temps de la fréquence de dépose. Ce phénomène est certainement lié à la propreté du gripper qui, à force de prendre des billes, s'encrasse en peu et colle donc plus. Ce phénomène est moins visible dans l'azote. Il est probable que cette détérioration soit le fait de la pollution dans le temps des surfaces. L'azote limiterait ainsi cet apport de pollution car un flux continu arrive dans la zone de travail depuis une bombonne, limitant ainsi au maximum les interactions avec le reste de la pièce. Par contre la pollution de la surface du gripper par le contact avec les billes ne peut être évité.

Remarques :

- Il est très difficile et hasardeux de comparer les résultats d'une séance à l'autre. En effet, bien que les paramètres d'humidité et de température ne changent pas ou peu, la qualité des manipulations diffère du tout au tout entre les séances. Cela reflète que certains paramètres ne sont pas encore maîtriser ni isoler, car il est encore impossible de donner des raisons de ces fluctuations.

- une série de tests à connu un comportement visiblement électrostatique. L'ionisateur a permis d'atténuer ce comportement.

4.5 Caractérisation de la précision et répétabilité de la dépose

Pour les tests de précisions, il a été décidé de les réaliser que dans les cas les plus favorables. Pour nous c'était le cas du gripper en verre dans l'air. Cependant, comme les résultats n'étaient pas fantastiques comparés aux gripper d'un autre type (par exemple pince...), des tests ont été aussi effectués avec le gripper en Si pour déterminer si un gripper plat donnait de meilleurs résultats qu'un gripper sphérique. En effet, la bille de verre peut être considérée comme plane si on arrive à prendre la bille de PS exactement au fond de celle-là, mais les différentes caméras ne permettent pas de s'assurer une prise exacte. D'autre part, on ne sait pas l'impact que cela peut avoir sur la dépose de la bille (figure 48).

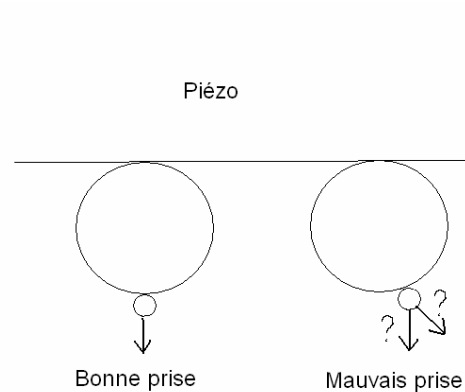


Figure 48 : Illustration de la dépose avec un gripper sphérique

Un autre paramètre intéressant est de connaître si une excitation continu ou impulsion a une influence sur la précision de la dépose.

Pour, le test, la fréquence de dépose a été fixée à 500[kHz], ce qui nous permet d'assurer une dépose à tous les coups en continu et presque tous les coups en single (cf chap 4.4). Il serait intéressant d'effectuer une autre série d'expériences pour savoir si la fréquence de dépose a une influence sur la précision.

Les résultats sont présentés sous la forme d'une cible où le centre est la position de la bille avant la prise. La précision est mesurée par la moyenne et l'écart-type. Toutefois, certaines valeurs sont beaucoup trop mauvaises et elles seront considérées comme des déposes ratées pour ne pas trop fausser le calcul des valeurs statistiques.

La hauteur de la dépose s'effectue entre 7 et 12[μm]

Pour résumer, trois paramètres seront caractérisés :

- taux de succès de dépose
- précision représentée par la moyenne
- répétabilité représentée par l'écart type

Les conditions d'environnement sont fixées à l'air. Les excitations seront continues pour la surface de contact en verre et en Si et des mesures en impulsion seront menées dans le cas du verre.

4.5.1 Gripper de Verre

Pour la bille de verre comme surface de contact. Il y a eu 6 déposes jugées mauvaises (erreurs supérieures à 20microns) sur 66 essais, soit un taux d'échec de 9%.

Dépose en continu :

Trois déposes ont été jugées mauvaises (distance supérieure à 20 microns de la cible) sur les 32 déposes, soit un taux de 9.4%.

	Précision [μm]	Répétabilité [μm]	Taux de succès
Gripper verre, excitation continue	4	4.35	90.40%

Figure 49 : Dépose en continu pour le gripper bille de verre

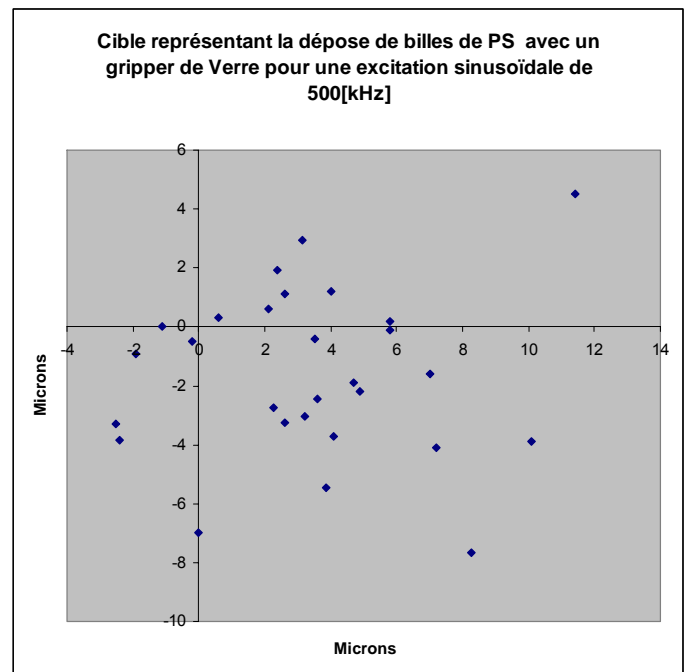


Figure 50 : Dépose de billes en continu pour le gripper bille de verre

Dépose en single

Trois déposes ont été jugées mauvaises (distance supérieure à 20 microns de la cible) sur les 35 déposes, soit un taux de 8.6%.

	Précision [μm]	Répétabilité [μm]	Taux de succès
Gripper verre, excitation continue	3	6,9	91.60%

Figure 51 : Dépose en single pour le gripper bille de verre

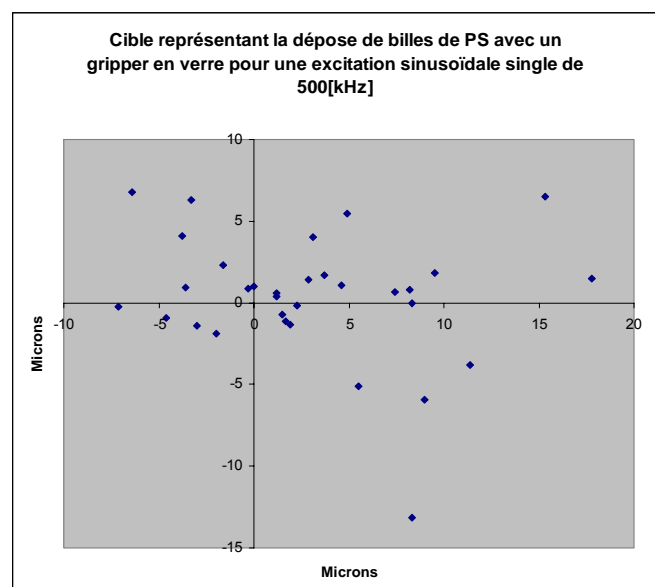


Figure 52 : Dépose de billes en single pour le gripper bille de verre

4.5.2 Gripper de Si

Les mesures n'ont été faites que dans le cas d'une excitation continue.

Sur les 26 déposes, seules 2 ont été jugées insatisfaisantes car trop mauvaise (erreur > 20 microns), ce qui correspond à 8%.

	Précision [μm]	Répétabilité [μm]	Taux de succès
Gripper silicium, excitation continue	2.5	7.2	92%

Figure 53 : Dépose en continu pour le gripper silicium

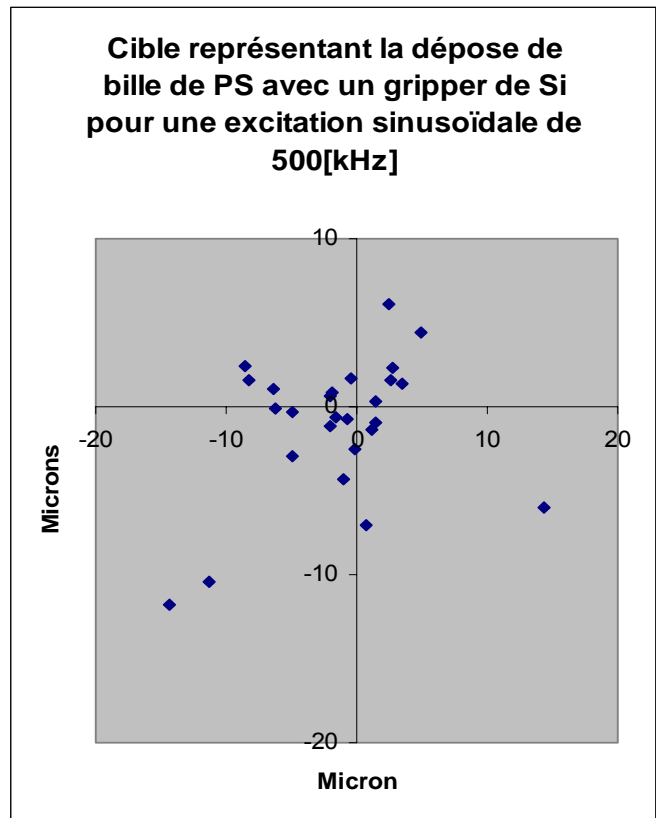


Figure 54 : Dépose de billes en continu pour le gripper de silicium

4.5.3 Conclusion caractérisation de la précision et de la répétabilité

Les déposes ratées sont le fait de la vibration de la bille de polystyrène sur la surface de contact. Ce phénomène est récurrent sur une surface de contact plane ou sphérique (figure 55).

Dans le cas de la surface plane (soit notre silicium), ce phénomène est plus critique car la bille a tendance à faire de plus longs déplacements et à aller se mettre dans l'angle de la surface, où la dépose est impossible (figure 56).

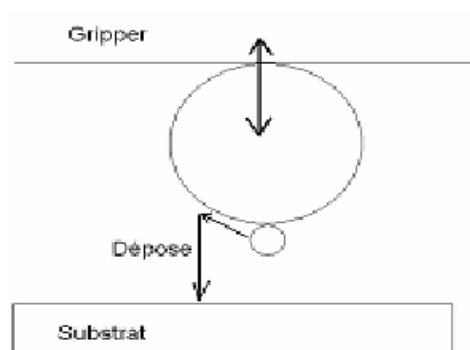


Figure 55 : Illustration des vibrations avant la dépose

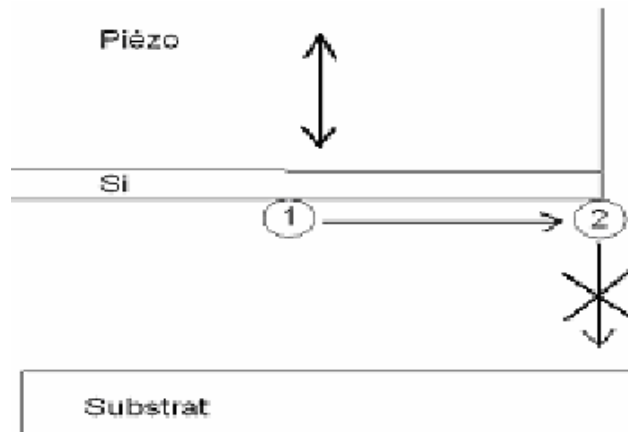


Figure 56 : Illustration de la dépose avec vibration sur la surface de silicium

Par contre, dans le cas de la bille comme surface de contact, les billes attrapées vibrent tout autant, mais tombent manifestement quand elles sont au « fond de la bille » (figure 57).

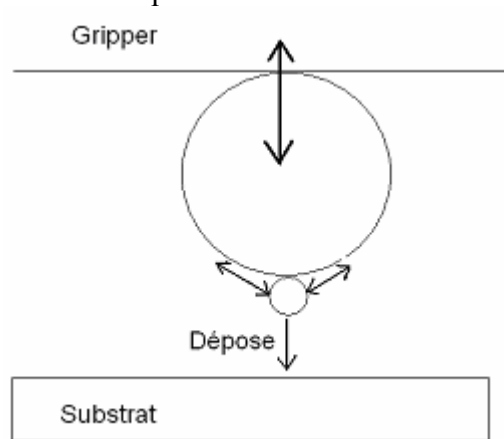


Figure 57 : Vibration et dépose pour une surface sphérique de verre

Il serait intéressant de tester la précision de la dépose avec des accélérations nettement supérieures pour analyser s'il est possible d'éliminer les vibrations et avoir une meilleure dépose, malheureusement notre amplificateur n'a pas permis de faire ces tests (échauffement à partir de 600[kHz]).

Le taux de réussite est sensiblement identique pour tous les cas étudiés. De plus, un taux de 90% est un résultat vraiment positif pour ce premier prototype.

En comparant, pour le verre, la dépose en continu et en impulsion. On peut se rendre compte que le continu donne des résultats meilleurs d'un facteur 1,5.

La comparaison entre le verre et le silicium donne le même avantage de répétabilité au premier d'un facteur 1.6. Par contre il n'est pas possible de déterminer si la meilleure qualité vient de la forme de la surface (sphère pour le verre plan pour le silicium) ou de la différence d'intensité des forces d'adhésion.

	Précision [μm]	Répétabilité [μm]	Taux de succès
Gripper silicium, excitation continue	1.5	7.2	92%
Gripper verre, excitation continue	4	4.35	90.40%
Gripper verre, excitation single	3	6.9	91.60%

Tableau 14 : Résumé de la caractérisation de la dépose

Les cibles des déposes avec la bille de verre comme gripper révèlent certainement une tendance à prendre la bille un peu sur la droite de la bille de verre, car les déposes se sont faites pour la plus part à droite de la cible. Cela montrerait que la dépose se fait avec un angle si la surface du contact n'est pas parallèle au mouvement du piézoélectrique.

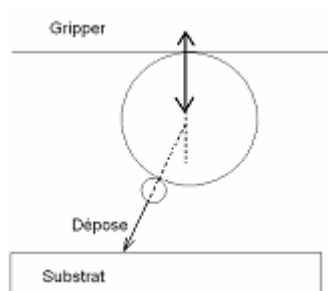


Figure 58 : Illustration d'un angle de dépose pour un surface de contact sphérique

4.6 Tests complémentaires

4.6.1 Prise normale et roulée

Durant les expériences, il a été constaté que bien souvent la prise était plus facile en faisant descendre la gripper puis faire rouler la bille entre le gripper et le substrat et finalement relever le gripper, par rapport à la prise normal qui est simplement de descendre le gripper sur la bille à attraper et de remonter.

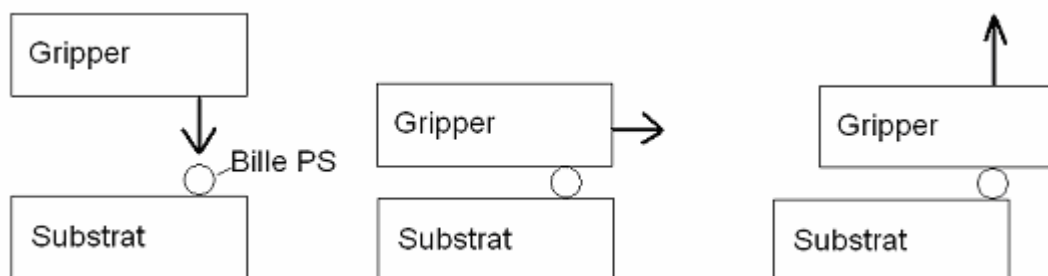


Figure 59: Schéma explicatif de la prise roulée

Dans ce cas aussi, ce phénomène pourrait représenter cette constante de temps de la force d'adhésion. En effet, en faisant rouler, les liaisons entre les différents matériaux sont cassées et en remontant tout de suite, nous profitons de cette baisse des forces d'adhésion.

Un test a permis de déterminer quand il était nécessaire d'utiliser cette méthode pour prendre une bille : sur 77 échantillons, seuls 15 ont nécessité ce type de prise, soit dans 20% des cas. Ce procédé est donc pratique pour prendre certaines billes, mais par contre, comme on déplace la bille sur le substrat, elle n'est pas recommandable pour des manipulations de précision.

4.6.2 Prise à force constante

Vu la difficulté de se rendre compte lorsque la bille est en contact avec le gripper, il n'est pas possible de savoir quelle force on applique sur cette bille lors du contact.

Comme on connaît la raideur de notre lame, on peut connaître la force de retour pour une certaine flèche. Nous allons profiter de cette flèche pour appliquer une force de contact constante sur la bille. Dans nos tests, la flèche est fixée à 50[μm] puis 100[μm] et l'excitation du piézoélectrique est continue. Les force sont donc de 50[μN] et 100[μN]

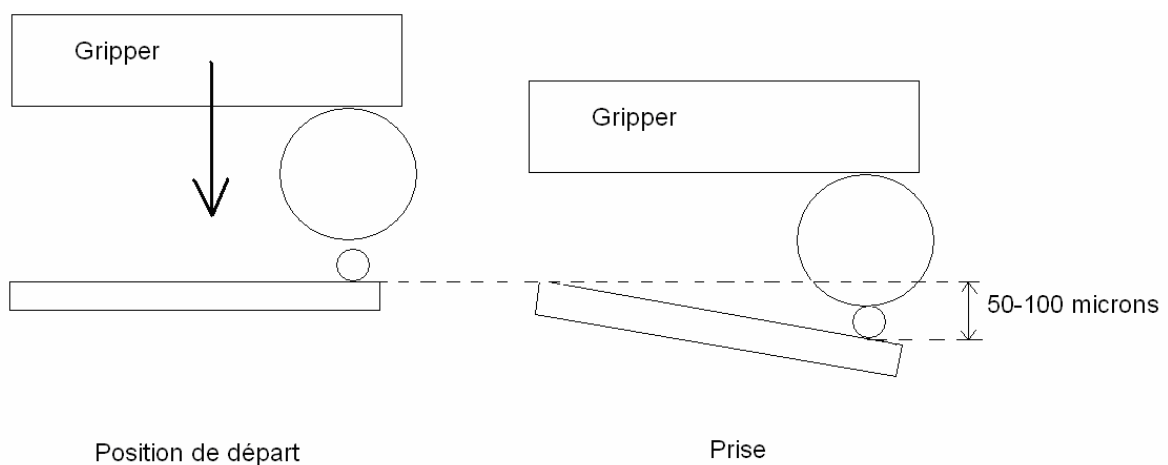


Figure 60 : Illustration de la prise à force constante

Les mesures ont été effectuées pour 20 échantillons dans chacun des cas.

- Flèche 50[μm] fréquence de dépose moyenne : 272[kHz]
- Flèche 100[μm] fréquence de dépose moyenne : 277[kHz]

La différence est très faible entre les deux. Comme les deux séries de mesures ont été exécutées à la suite, cette petite différence est certainement le fait de la dégradation de la qualité de la dépose plus que de la différence de force de contact.

Cela révèle que la force d'adhésion est constante pour autant que la force d'appui du gripper sur la bille ne soit pas trop grande.

4.6.3 Dépose en vibration

Lors des expériences de caractérisations de la dépose, les billes chutaient de 10[μm]. Afin d'améliorer la précision, cette distance est diminuée. Dans le cas de cette expérience, cette distance est même nulle. Dès qu'il y a contact, l'excitation est lancée.

Les résultats ne sont pas du tout satisfaisants car dès que l'excitation commence, la bille se met à vibrer et de déplacer sous l'effet du mouvement du gripper.

Cette méthode n'offre donc que peu d'intérêt.

4.6.4 Nettoyage des billes

Il a été essayé de nettoyer les billes. Pour ce faire, des billes sont mélangées à de l'isopropanol dans une seringue.

Une goutte de ce mélange est ensuite déposée sur le substrat. Avant de manipuler, il faut attendre que la goutte s'évapore.

Il fallait faire attention à prendre un minimum de billes dans la goutte. En effet, si ce n'est pas le cas, en s'évaporant, l'isopropanol regroupe les billes qui ne sont plus possibles à manipuler (photo 5).

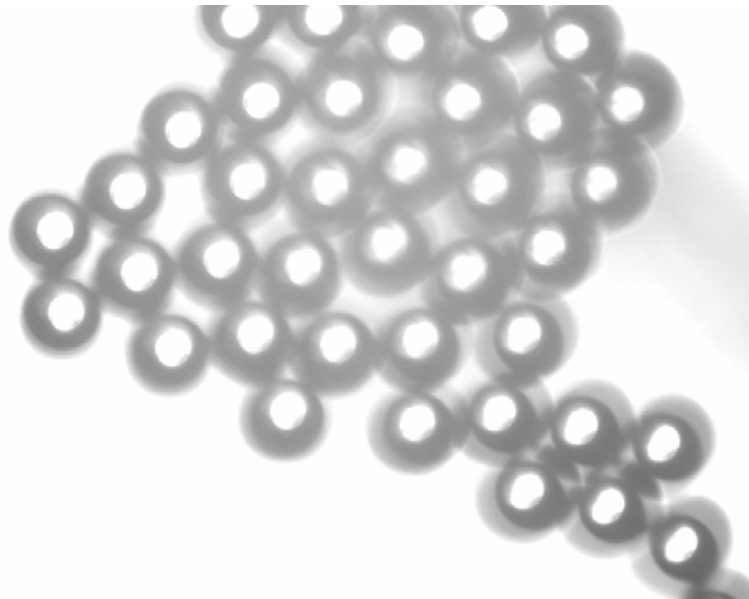


Photo 5 : Billes groupées après évaporation de l'isopropanol

D'autres essais, on été réaliser en isolant une bille. Cependant l'effet du nettoyage n'est pas celui escompté car aucune de ces billes n'ont put être prises.

5. Gripper passif

Un autre procédé de dépose a été étudié brièvement durant le semestre.

La prise fait toujours par adhésion. Par contre, l'accélération est donnée par un choc provoqué par une masse tapant contre une butée. Le déplacement de la masse (sur laquelle est fixé la surface de contact) se ferait par inertie grâce à un déplacement rapide de tout le préhenseur (à travers le robot delta³). La masse est guidée par une lame.

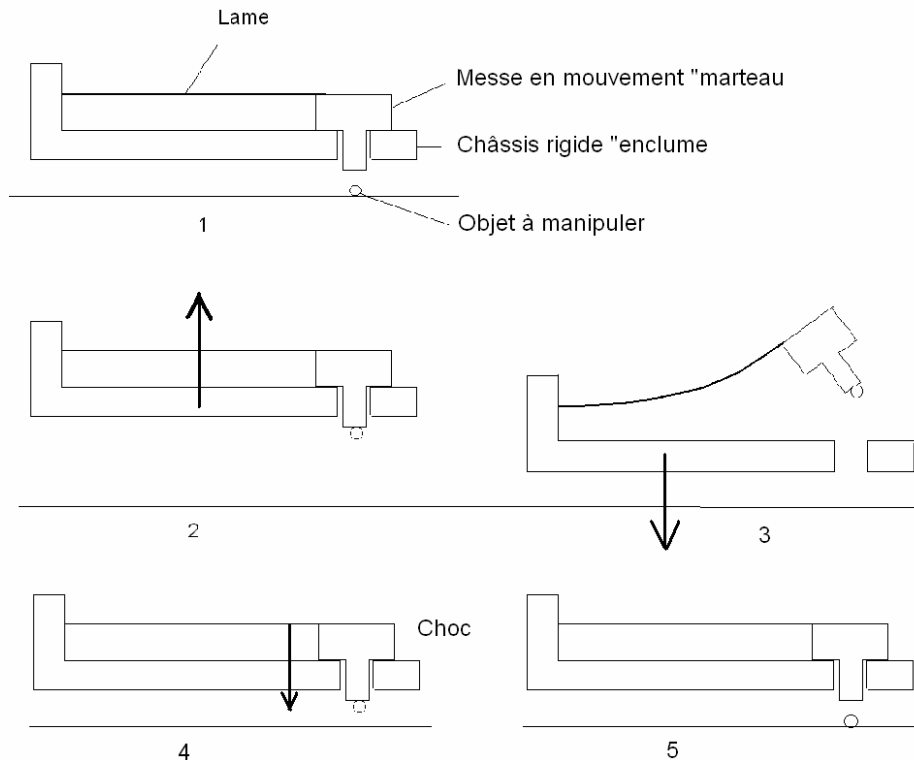


Figure 61 : Schéma explicatif du gripper passif

Fonctionnement du préhenseur passif (figure 61) :

1. présentation des composants essentiels
2. monter rapidement tout le gripper
3. le descendre rapidement : l'inertie du « marteau » et la souplesse de la lame fait que le marteau ne suit pas le mouvement du châssis
4. la lame applique une force de retour qui est associée au poids du marteau. Le marteau frappe l'enclume.
5. l'énergie du choc fait déposer l'objet manipulé

L'intérêt de ce système est d'une part que si l'on précontraint la lame, on a un système de compliance intégré directement au préhenseur et d'autre part que l'on s'affranchit des différentes bandes passantes du système présenté dans ce projet. La seule limite de fonctionnement réside dans la vitesse et accélération du robot qui déplace le gripper.

6. Conclusion

Ce projet a donc permis de mettre en œuvre une méthode de prise par adhésion et de dépose par effet dynamique engendré par un piézoélectrique.

Malgré l'utilisation d'un prototype dont les caractéristiques ne sont pas optimales pour ce genre de micromanipulation, de nombreuses caractérisations ont pu être réalisées notamment avec des billes de polystyrène de 50[μm] comme objet manipulé et grâce au dispositif de compliance conçu :

- Qualité de la prise selon le milieu, les matériaux et le type de prise
- Seuil de dépose pour différents matériaux, différents milieux et différentes excitations
- Précision pour les deux excitations
- Répétitivité pour les deux excitations
- Dépose pour des prises à forces différentes

La caractérisation de la prise a révélé que les billes étaient attrapables à plus de 99,5% et qu'il était possible de le faire en un essai environ 75% du temps.

La dépose quand à elle (tableau 15) révèle aussi un bon taux de succès avec plus de 90%.

	Précision [μm]	Répétabilité [μm]	Taux de succès
Gripper silicium, excitation continue	2.5	7.2	92%
Gripper verre, excitation continue	4	4.35	90.40%
Gripper verre, excitation single	3	6.9	91.60%

Tableau 15 : Rappel de la caractérisation de la dépose

La précision et la répétabilité donnent des résultats satisfaisants pour un premier prototype. Par contre, cela n'atteint pas les performances d'autres gripper du laboratoire dont la répétabilité est plus petite que 1 micron.

On pourra aussi noter que ce type de gripper a eu deux utilisations :

- **outil** : avec la prise et la dépose il est possible de faire par exemple du pick and place
- **instrument de mesure** : il permet de mesurer les forces d'adhésion des matériaux ou un seuil d'accélération

Un point intéressant encore est que la taille de objets manipulés peut être baissée à l'envie, il faut simplement augmenter l'accélération de dépose et donc à nouveau perfectionner le préhenseur et l'électronique qui excite le piézoélectrique.

Ces différentes caractérisations révèlent un potentiel pour la micromanipulation avec dépose dynamique et prise par adhésion. Cependant, avant de pouvoir utiliser cette technique, il faudrait apprendre à maîtriser les paramètres importants et dont l'influence n'est pas bien connue, comme la propreté des surfaces.

Bibliographie

- [1] J.-P. Bacher – M. Dafflon, “Manipulating Microscale objects with Nanoscale Precision”, EPFL, Lausanne, Suisse, mai 2004,
- [2] S. Haliyo, S Regnier. J.-C. Guinot, “ Dépose dynamique d’un micro-objet saisi par adhésion”, Laboratoire de robotique de Paris, Paris, 2003
- [3] W. Drisen, T Varidel, S. Régnier, J-M Breguet, “ Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots”, EPFL-LSRO, Lausanne, Suisse, 2005
- [4] PI (Physik Instrumente) GmbH & Co, février 2005, <http://www.physikinstrumente.com>
- [5] Haliyo, “Dynamical strategies for the micro-manipulation by adhesion”, laboratoire de Robotique, Paris, 2001
- [6] R. S. Fearing, « Sirvey of sticking effects for micro Parts Handling », Berkeley, USA, 1995
- [7] F. aria, D. Andou, T. Fukuda, “Adhesion forces reduction for micro-manipulation based on micro physics” Nagoya, Japan, 1996
- [8] S. Haliyo, F. Dionnet, S. Régnier, « Advanced micro-manipulation applications », laboratoire de robotique, Paris, 2003
- [9] M Del Pedro, « Elements de mécanique des structures », Lausanne, 2001
- [10] J.-P. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz, « Introduction à la science des matériaux », Lausanne, 1999